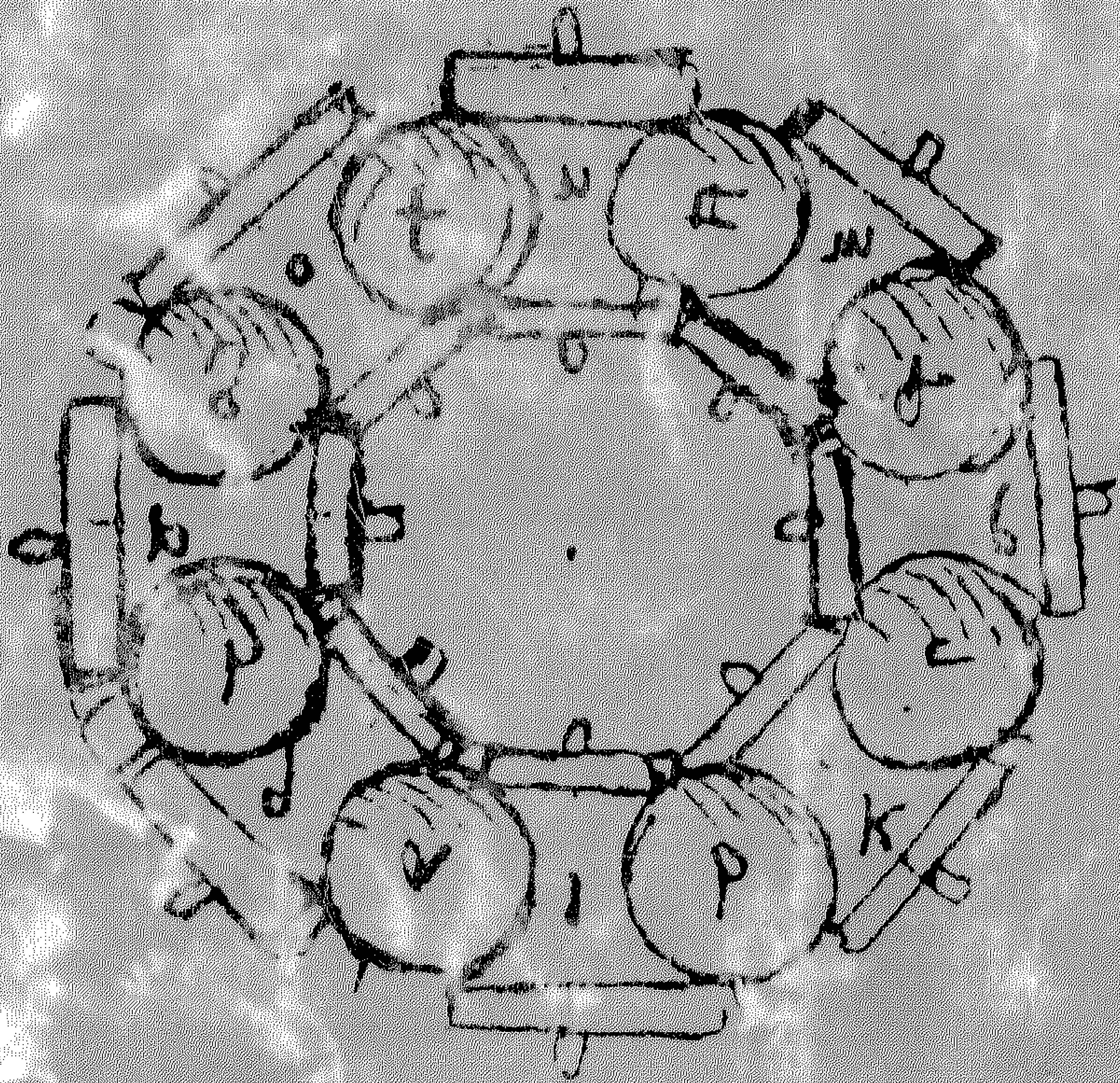
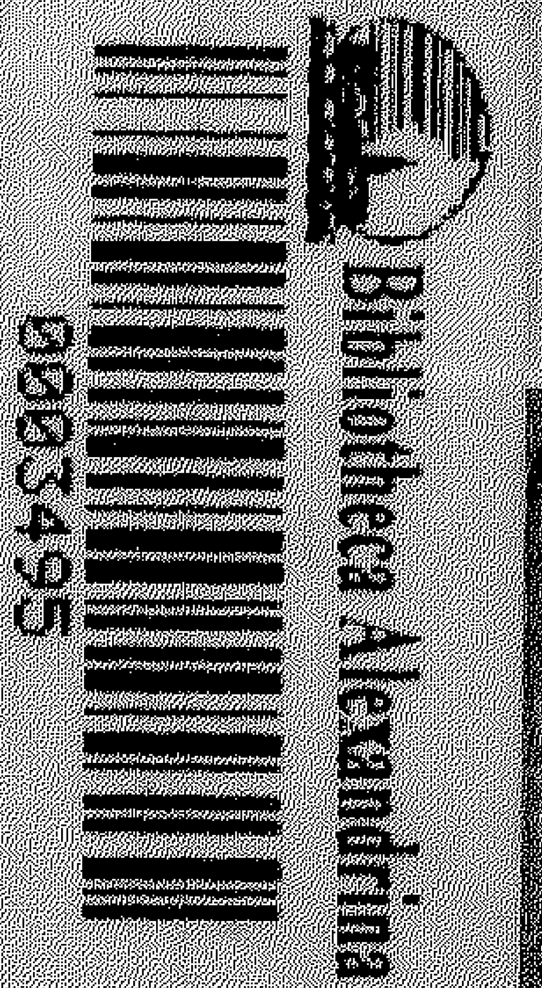
بوش

الطبعة الثانية



الدار الدولية للنشر والتوزيع

القاهرة ... لندن



أساسيات الفيزياء

تأليف

ف. بوش

استاذ الفيزياء بجامعة دايتون

ترجمة

الدكتور سعيد الجزيرى
قسم الفيزياء - كلية العلوم
جامعة القاهرة

الدكتور محمد أمين سليمان
قسم الفيزياء - كلية العلوم
جامعة القاهرة

مراجعة

الاستاذ الدكتور محمد عبد المقصود النادى
استاذ الفيزياء النووية
كلية العلوم - جامعة القاهرة



الدار الدولية للنشر والتوزيع

حقوق النشـــر

الدار الدولية للنشر والتوزيع

ص.ب ٥٥٩٩ هليوبوليس غرب — القاهرة
ت : ٢٥٨٢٨٨٧
تلكس : ٢٠٠٧٠/٢٠٠٧١ PBCRB UN
فاكس : ٠٠٢٠٢/٢٩١٨٠٥٩

ISBN: 07 084284 1

معامـلات التحويـــل

ميزت التحويلات المضبوطة بالعلامة النجمية" . وللاختصار فإن معاملات التحويل قد كتبت في الصورة اللابعدية . ولاستخدام هذه المعاملات يلاحظ أن الصورة الرمزية . 2.54 cm/in تعنى أن هناك 2.54cm في كل 1 inch . وعند ضرب كمية معينة في أحد هذه المعاملات فإن وحدات هذه الكمية فقط هي التي تتغير . وعلى سبيل المثال فإن .

$$30\ \text{in} = (30\ \text{in})\left(2.54\ \frac{\text{cm}}{\text{in}}\right) = 76.2\ \text{cm}$$

و

$$5\ \text{cm} = (5\ \text{cm})\left(\frac{1}{2.54\ \text{cm/in}}\right) = 1.97\ \text{in}$$

الضغـط

* $1.01325 \times 10^5\ (\text{N/m}^2)/\text{atm}$
* 1.01325 bars/atm
* $0.10\ (\text{N/m}^2)/(\text{dyn/cm}^2)$

$6.895 \times 10^3\ (\text{N/m}^2)/(\text{lb/in}^2)$

$133.32\ (\text{N/m}^2)/\text{mm Hg at } 0^{\circ}\text{C}$

76 cm Hg/atm

$14.7\ (\text{lb/in}^2)/\text{atm}$

1 Torr/mm Hg

الشغـل والطـاقة

* 10^7 ergs/J
* 4.184 J/cal
* 3.60×10^6 J/kWh
* 1054 J/Btu

1.6022×10^{-19} J/eV

6.242×10^{18} ev/J

0.239 cal/J

0.738 ft.lb/J

23.06 (kcal/g mol)/(eV/molecule)

1 u↔931.5 MeV

القـدرة

746 W/hp

550 (ft.lb/s)/hp

الكهربائيـة

1.6022×10^{-19} C/electron charge

96.485 C/faraday

* 10^4 G/T

الطـول

* 2.54 cm/in
* 0.3048 m/ft
* 1.609344 km/mi

9.461×10^{15} m/light-year

الزمـن

* 86,400 s/day

3.16×10^7 s/yr

الكتلـة

1.6606×10^{-27} kg/u

6.022×10^{26} u/kg

السـرعة

* 0.3048 (m/s)/(ft/s)

60 (mi/h)/88 (ft/s)

1.47 (ft/s)/(mi/h)

0.447 (m/s)/(mi/h)

1.609 (km/h)/(mi/h)

القـوة

* 10^5 dyn/N

4.45 N/lb

0.225 lb/N

1 kg weighs 2.21 lb at $g = 9.80\ \text{m/s}^2$

معطيات وثوابت فيزيائية

سرعة الضوء	c	$= 2.997925 \times 10^{8}$ m/s
ثابت الجاذبية	G	$= 6.67 \times 10^{-11}$ $N.m^2/kg^2$
عدد أفوجادرو	N_A	$= 6.022 \times 10^{26}$ particles/ kg.atom
ثابت بولتزمان	k	$= 1.3807 \times 10^{-23}$ J/K
ثابت الغاز	R	$= 8314$ J/(kg)(mol)(K)
		$= 1.9872$ kcal/(kg)(mol)(K)
ثابت بلانك	h	$= 6.6262 \times 10^{-34}$ J.s
شحنة الالكترون	e	$= 1.60219 \times 10^{-19}$ C
كتلة السكون للالكترون	m_e	$= 9.1095 \times 10^{31}$ kg
		$= 5.4859 \times 10^{-4}$ u
كتلة السكون للبروتون	m_p	$= 1.67265 \times 10^{-27}$ kg
		$= 1.0072766$ u
كتلة السكون للنيوترون	m_n	$= 1.67495 \times 10^{-27}$ kg
		$= 1.0086650$ u
ثابت المجاوزية (السماحية)	ε_o	$= 8.85419 \times 10^{-12}$ $C^2/N.m^2$
ثابت الانفاذية	μ_o	$= 4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2
تسارع الجاذبية العيارى	g	$= 9.80665$ $m/s^2 = 32.17$ ft/s^2
كتلة الأرض		5.98×10^{24} kg
متوسط نصف قطر الأرض		6.37×10^{6} m
متوسط كثافة الأرض		5.57 g/cm^3
متوسط المسافة بين الارض والقمر		3.84×10^{8} m
متوسط المسافة بين الأرض والشمس		1.496×10^{11} m
كتلة الشمس		1.99×10^{30} kg
نصف قطر الشمس		7×10^{8} m
شدة الاشعاع الشمسى عند الأرض		0.032 $cal/(cm^2)(s) = 0.134$ $J/(cm^2)(s)$

المحتويـــات

مقدمـــة

مقدمـــــة

منحنا الأقبال الواسع على الطبعات السابقة من كتاب « اساسيات الفيزياء » موارد قيمة ممثلة فى الانتقادات البناءة التى وافانا بها كثير من مستعمليه . وعند اعداد هذه الطبعة طلبنا من أعضاء هيئة التدريس والطلاب أن يتكرموا بتقديم اقتراحاتهم وتعليقاتهم على الطبعة السابقة ، مما ساعدنا على اجراء كثير من التغييرات فيها بالرغم من أن الملامح الاساسية للطبعة السابقة قد تم الاحتفاظ بها فى الطبعة الحالية . ويمكن تلخيص أهم التغييرات فيما يلى .

اعيد فحص جميع المسائل وعدلت المسائل السابقة عند الضرورة ، وأضيف كثير من المسائل الجديدة ، كما تعالج كثير من المسائل الجديدة الموضوعات الهامة لطلاب العلوم البيولوجية . تنقسم المسائل حسب درجة صعوبتها إلى ثلاثة أقسام : مسائل عادية ومتوسطة الصعوبة وصعبة . وحتى يزداد اعتياد الطلاب على النظام المترى للوحدات فقد تجنبنا التركيز على النظام البريطانى للوحدات اذ إستعمل فقط فى الاجزاء الأولى من الكتاب حتى يعتاد الطلاب تدريجيا على العمل فى الفيزياء .

أعيد كتابة كثير من الاجزاء والفصول لزيادة توضيحها ولاستثارة عنصر التشويق لدى الطلاب . وبالرغم من أن هذه التغيرات واسعة جدا لدرجة يستحيل معها الاشارة لها جميعا هنا ، فمن الضرورى أن نذكر ثلاثة منها : (١) يفضل بعض المدرسين مناقشة الاستاتيكا فى مرحلة مبكرة من المقرر التعليمى ويفضل البعض الآخر ارجاء معالجة الاجسام الجاسئة إلى مرحلة متأخرة . ولكن من الممكن استخدام كلا المدخلين فى هذا الكتاب ، إذ نوقش موضوع الاستاتيكا فى القسم الاول من الفصل التاسع ، ولكن هذا الموضوع وكذلك مادة القسم الاخير من هذا الفصل والمرتبطة به قد صيغت بحيث يمكن وصفها فى القسم الاخير من الفصل الأول إذا اريد ذلك (٢) زيدت المادة المتعلقة بموضوع الديناميكا الحرارية ، ووضعت فى فصل مستقل جديد . (٣) بالرغم من أن النسبية قد نوقشت باختصار فى مرحلة مبكرة من متن الكتاب فإن الجزء الاساسى من هذا الموضوع قد كتب من جديد ورحل الى الفصل السادس والعشرين . ويمكن للقارىء ملاحظة كثير من التغيرات المفيدة الأخرى عند مقارنة الطبعتين الثانية والثالثة .

كذلك فإن الفعالية التعليمية لمتن هذا الكتاب قد طورت بطرق مختلفة ، إذ وضعت فى نهاية كل فصل قائمة بالحد الادنى من الاهداف التعليمية وملخص ومجموعة من المصطلحات والعبارات الهامة ، كما احتفظ بالاسئلة والتخمينات الشائعة المتعلقة بموضوع الفصل . ويعتبر الاسلوب المستخدم فى الكتاب لجذب الانتباه إلى الجمل والعبارات الهامة ميزة جديدة ، فهى فى الواقع تؤدى العمل الروتينى فى وضع الخطوط تحت الكلمات والعبارات الهامة وهى الطريقة التى

يستخدمها كثير من الطلاب المجدين بنجاح كبير . والآن فإن الطلاب ، وخاصة غير الماهرين منهم فى تحديد المفاهيم الهامة ، قد زودوا بهذه الوسيلة التعليمية القيمة .

لقد ساهم كثير من أعضاء هيئة التدريس والطلاب باقتراحاتهم فى هذه الطبعة الجديدة ، وأنا مدين لهم بالشكر والعرفان . كما شارك ثلاثة بمقالات نقدية مفصلة وافية وهم الاساتذة جيرارد ف . لاتيز ومارلو ر. مارتن وجورج و . باركر ، وانى اقدر مساعدتهم عظيم التقدير . وأنا أرحب بالاقتراحات التى يمكن للقارىء تقديمها لمزيد من تحسين هذا الكتاب . كذلك فإنى أقدم جزيل شكرى الى زوجتى فيليس لمساعدتها فى اعداد مخطوط الكتاب .

ف.بوش

الفصـــل الأول

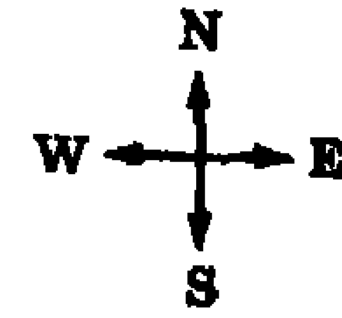
المتجهات والقــوى المتزنة

يمثل وصف وتفسير الظواهر الفيزيائية القسم الأعظم من علم الفيزياء . ولايجاد العلاقة المتبادلة بين الملاحظات التجريبية المتعلقة بالكون الفيزيائى وفهمها واستخدامها من الضرورى أن نتعامل مع بعض المفاهيم مثل القوة والحركة والازاحة . وتنتمى هذه المفاهيم ، وكذلك كثير من المفاهيم التى سنقابلها فيما بعد ، الى مجموعة من الكميات المسماة **بالمتجهات** . هذه الكميات يمكن وضعها بطريقة مناسبة تماما باستخدام أسهم خاصة . سنتعرف فى هذا الفصل على طبيعة الكميات الموجهة وكيفية استخدامها ، وسنرى أن مفهوم القوة الموجهة هو أداة مناسبة لوصف المواقف التى تتزن فيها جميع القوى .

١ - ١ المتجهات :

اذا أخبرت شخصا ما بأنك قد قدت سيارتك مسافة 30 mi (miles) الى الشرق فانك تتحدث بلغة المتجهات . هذا يعنى أن لازاحة سيارتك مقدار واتجاه ، ومقدارها هو 30 mi واتجاها هو الشرق . تسمى الكميات ذات المقدار والاتجاه بالكميات **المتجهة** . وكما سنرى حالا فان الازاحة والقوة والسرعة هى كميات متجهة نموذجية . وهناك كثير من الكميات التى لا ترتبط بأى اتجاه وهى تسمى بالكميات **غير الموجهة** . فمثلا عدد البيض فى علبة من الكرتون هو كمية غير موجهة لأنه لا يرتبط بأى اتجاه .

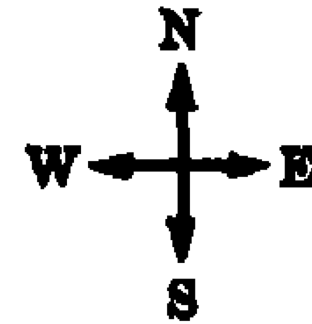
تعريف :



من أهم ملامح الكميات المتجهة أنه يمكن تمثيلها بواسطة الصور . لنفرض على سبيل المثال أن سيارة ما تسير مسافة 30 mi الى الشرق ، يمكن تصوير ذلك كما هو مبين بالشكل ١ - ١ . عندئذ تمثل ازاحة السيارة وقدرها 30 mi الى الشرق بواسطة سهم يتجه نحو الشرق ، وهذا السهم يسمى متجه . يوضح اتجاه السهم (أو المتجه) أن الازاحة فى اتجاه الشرق . ويختار طول السهم بحيث يتناسب مع مقدار الازاحة وهو 30 mi فى هذه الحالة . فمثلا يمكن تمثيل مسافة 1 mi بمسافة قدرها * 1 mm (millimeter). وعليه فان طول السهم الذى يمثل ازاحة قدرها 30 mi سيكون (30) (1) mm أو 30 mm. لنأخذ الآن مثال آخر :



يمثل المتجه ازاحة قدرها 30 mi شرقا



مثال توضيحى ١ - ١ : لنفرض أنك تريد تمثيل هذه العبارة : لقد قطعت مسافة 30 Km (Kilometers) شرقا ثم 10 Km شمالا *.

طريقة الحل : من الواضح هنا أن لدينا متجهين (سهمين) يمكن تمثيلهما كما بالشكل ١ - ٢ . لقد بدأت كما هو واضح من النقطة A ثم ذهبت أولا الى النقطة B ثم انتهيت عند النقطة C. من هنا يتضح أن الرسم البيانى للمتجهين هو وسيلة مناسبة لتصوير الحركتين المتتاليتين .

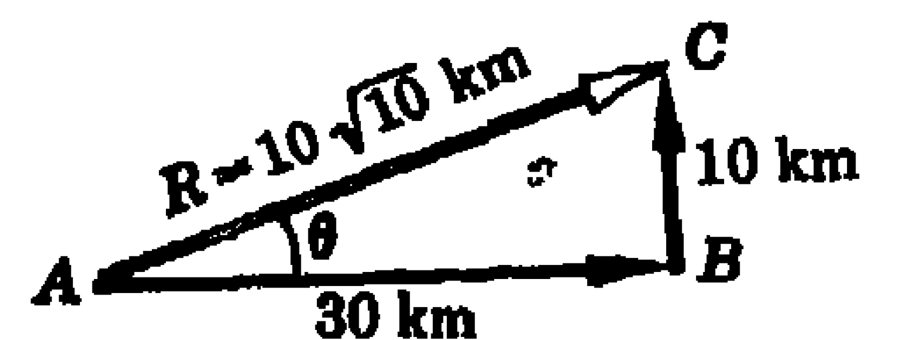


شكل (١ - ٢)
رسم بيان المتجهات لرحلة قطع فيها المسافر مسافة قدرها 30 km فى اتجاه الشرق ثم 10 km فى اتجاه الشمال

بالاضافة الى ذلك يبين الشكل ١ - ٢ أن نقطة النهاية للرحلة لم تكن على بعد 40 km من نقطة البداية ، اذ أن المسافة الفعلية بين النقطتين A و C هى طول السهم R المبين بالشكل ١ - ٣ .تسمى المسافة الخطية المستقيمة من نقطة البداية A الى نقطة النهاية C **بالازاحة** ، وهى بالطبع كمية متجهة وتمثل بالسهم R الموضح بالشكل ١ - ٣ .

تعريف

شكل (١ - ٣)
تكافىء الازاحتان 30 km شرقا ثم 10 km شمالا ازاحة محصلة قدرها $10\sqrt{10}$ فى الاتجاه المبين



---

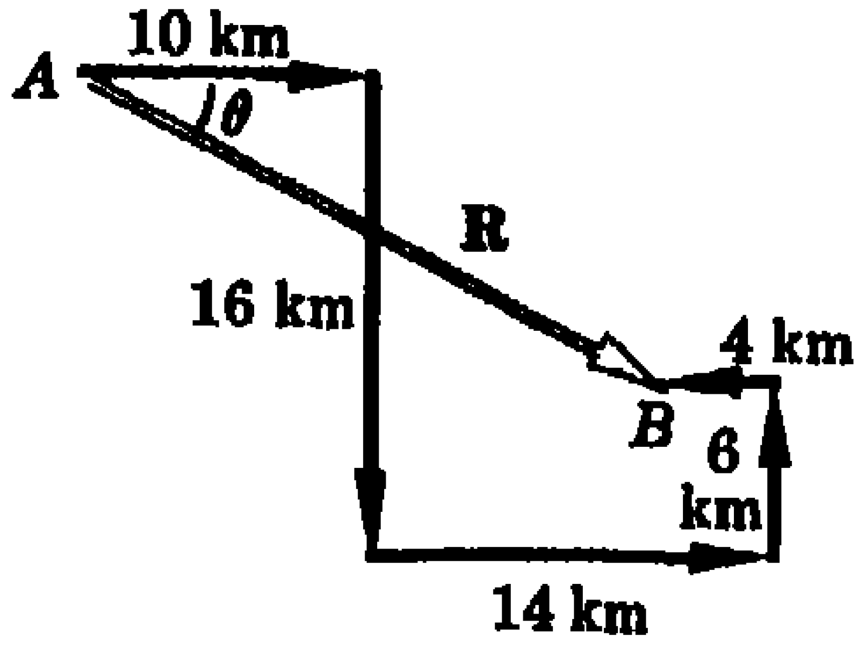
* 1 mm يساوى $^1/_{32}$ in. ولكى نكون أكثر دقة نعتبر ان 1 in = 25.4 mm, and 10 mm = 1.0 cm. (centimeters).

* 1 Km = 1000 m ((meters) = 0.62 mi.

يمكن حساب هذه المسافة باستخدام نظرية فيثاغورث للمثلث قائم الزاوية كما يلى :

$$R = \sqrt{(10)^2 + (30)^2}\ \text{km}$$
$$= \sqrt{1000}\ \text{km} = 10\sqrt{10}\ \text{km} \qquad (١ - ١)$$

حيث تسمى المسافة الخطية المستقيمة R من نقطة البداية الى نقطة النهاية **بالازاحة المحصلة** .



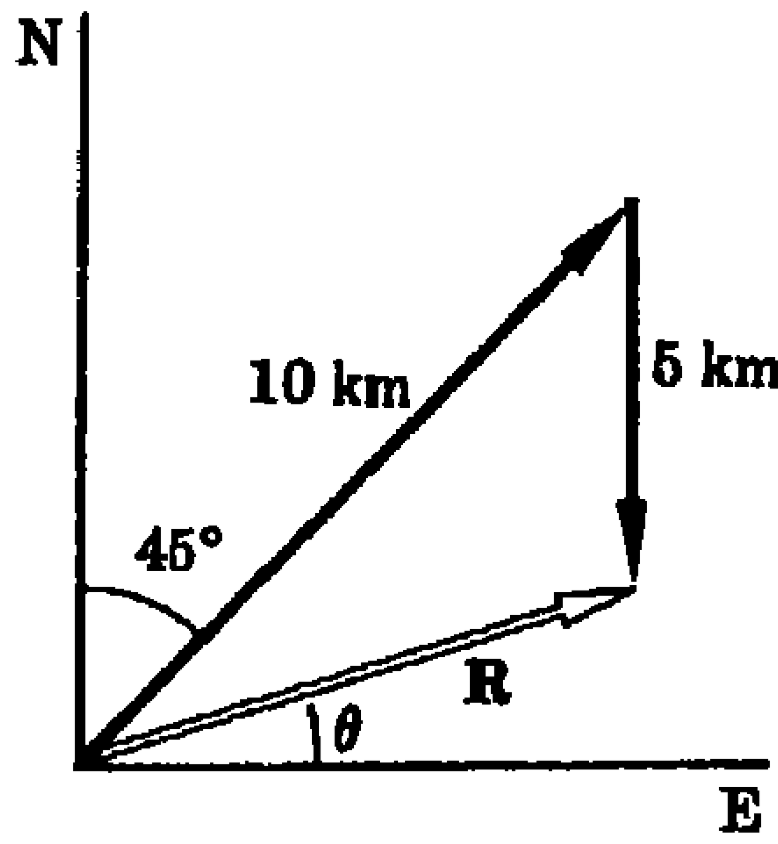
شكل (١ - ٤)
المسار الذى تقطعه السيارة فى المثال التوضيحى ١-٢ . بدأت السيارة من النقطة A وانتهت عند النقطة B .

من هذا نرى أن الازاحة المحصلة من نقطة بداية الرحلة تتحدد مقدارا واتجاها بالسهم المبين بالشكل ١ - ٣ . ويمكننا وصف الاتجاه بهذه الجملة « يميل المتجه المحصل بزاوية θ (ثيتا) فى الاتجاه الشمالى الشرق » . واذا نفذ رسم بيان المتجهات بدقة باستخدام مقياس رسم مناسب مع الأخذ فى الاعتبار أن الزاوية بين الازاحتين الموجهتين تساوى $90°$ تماما فان طول المحصلة يمكن أن يقاس مباشرة من هذا الرسم . عندئذ لابد أن تكون القيمة المستنتجة بهذه الطريقة مساوية لتلك القيمة التى يمكن الحصول عليها حسابيا باستخدام المعادلة (١ - ١) فى حدود خطأ مسطرة القياس . ويمكن استخدام المنقلة لقياس قيمة الزاوية θ .

تسمى هذه الطريقة لايجاد الازاحة المحصلة (مقدارا واتجاها) باستخدام المسطرة والمنقلة **بالطريقة البيانية** لحل المسألة ، وهى طريقة صحيحة تماما ويكون استخدامها مناسبا فى كثير من الحالات . يمكننا تلخيص هذه الطريقة فيما يلى :

لجمع المتجهات بيانيا نرسم هذه المتجهات بحيث ينطبق ذيل المتجه الثانى مع رأس المتجه الأول وينطبق ذيل المتجه الثالث مع رأس المتجه الثانى وهكذا . عندئذ يكون المتجه المحصل هو ذلك السهم الذى يبدأ من ذيل المتجه الأول وينتهى عند رأس المتجه الأخير . لنطبق هذه الطريقة فى المثال التوضيحى التالى :

مثال توضيحى ١ - ٢ : قطعت سيارة مسافة 10.0Km شرقا ثم 16.0 km جنوبا ثم 14.0 km شرقا ثم 6.0 km شمالا وأخيرا 4.0 km غربا . اوجد الازاحة المحصلة من نقطة البداية .



شكل (١ - ٥)
رسم بيان المتجهات لرحلة طولها 10 km فى الاتجاه الشمالى الشرق تليها رحلة أخرى طولها 5 km فى الاتجاه الجنوبى

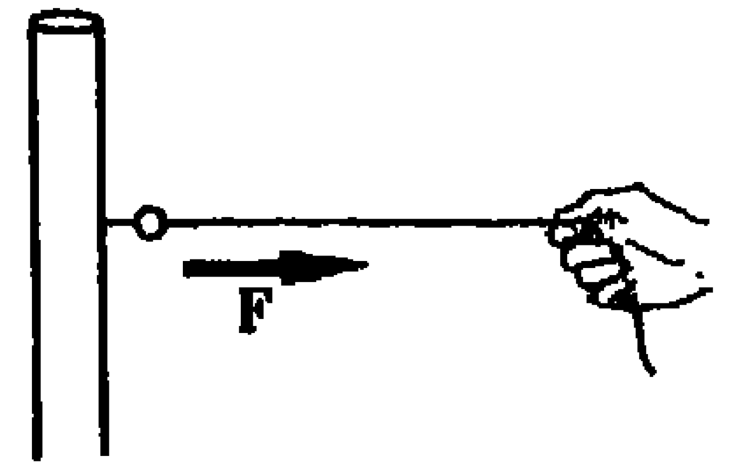
طريقة الحل : يمثل شكل ١ - ٤ رسم بيان المتجهات فى هذه الحالة . ومرة ثانية تعطى الازاحة المحصلة تماما بالسهم المبين بالشكل . فاذا استخدمت المسطرة لقياس طول هذا السهم سنجد أن مقدار الازاحة المحصلة هو 22.4 km. ولايجاد اتجاه المحصلة تقاس الزاوية θ باستخدام المنقلة وهى تساوى $26.5°$ فى الاتجاه الجنوبى الشرق .

ليس من الضرورى أن تكون جميع المتجهات متعامدة حتى يكمن استخدام هذه الطريقة فى العمل . لنفرض أنك تريد جمع ازاحة قدرها 5 km فى الاتجاه الجنوبى وازاحة

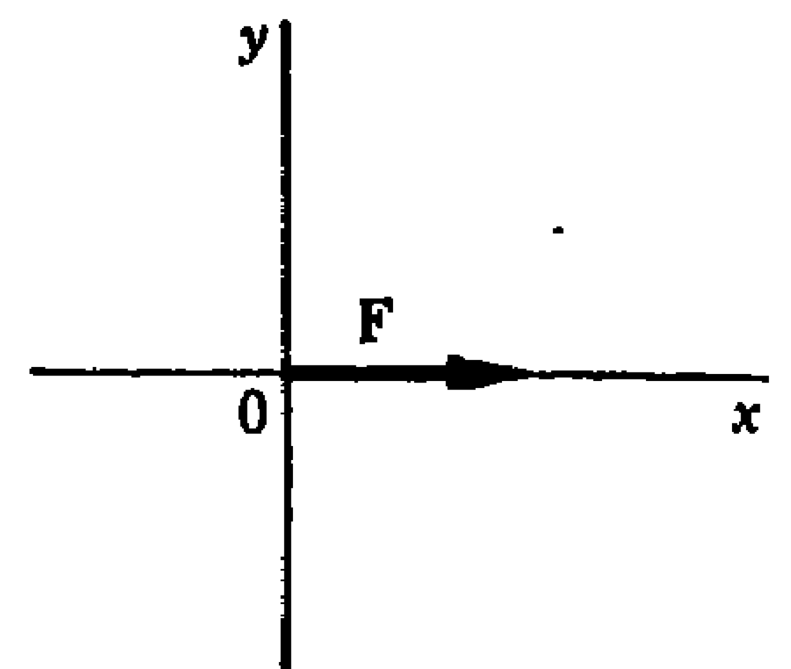
قدرها 10 km فى الاتجاه الشمالى الشرقى . تمثل هذه المسألة بيانيا كما بالشكل ١ — ٥ ، ومن الواضح أن الحل ليس أكثر صعوبة من تلك الحالة التى تكون فيها الازاحات الموجهة متعامدة . واذا كان لدينا عديد من المتجهات فان الحل سيكون مشابها تماما للشكل ١ — ٤ .

١ — ٢ متجهات أخرى غير الازاحة

يمكن استخدام المتجهات لتمثيل أية كمية ذات مقدار واتجاه معا . وللأغراض العملية لابد أن تتبع هذه الكمية نفس القوانين الرياضية التى تحكم الازاحة . وفى الحقيقة فان جميع الكميات ذات الاتجاه تحقق هذا الشرط . وعلى سبيل المثال نلاحظ أن القوى هى كميات موجهة هامة . ويمثل الشكل ١ — ٦ أحد المواقف النموذجية التى توضح الطبيعة الاتجاهية للقوى .



(أ)



(ب)

شكل ١ — ٦
يمكن تمثيل جذب الخيط للحلقة (الشد فى الخيط) بمتجه السرعة F .

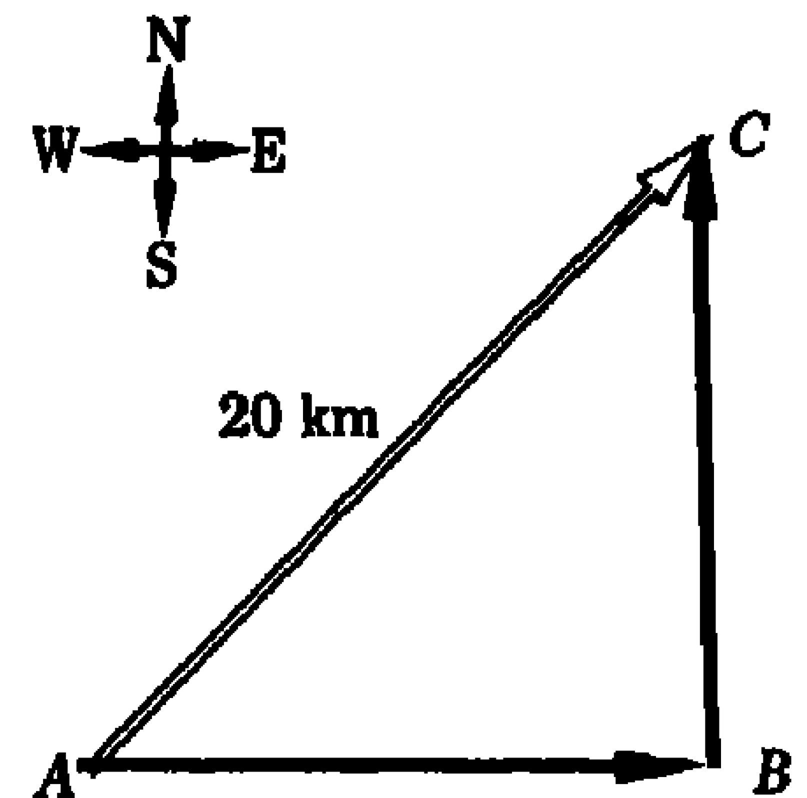
يمثل الشكل ١ — ٦ أ خيط يشد حلقة مثبتة فى قائم . تسمى القوى التى يجذب الخيط بها الجسم المثبت فيه **بالشد** فى الخيط . وكما هو واضح فى الشكل تمثل F هذا الشد ، ولهذه القوة التى يؤثر بها الخيط على الحلقة مقدار قيمته F واتجاه (الى اليمين) . وعليه فمن الممكن تمثيل هذه القوة بالمتجه (أو السهم) الموضح ، ويرسم هذا السهم بحيث يتناسب طوله مع مقدار القوة F . وحيث أن القوة تجذب الحلقة الى اليمين فان السهم الممثل لها يتجه أيضا الى اليمين .

يمكن تمثيل الموقف الموضح بالشكل ١ — ٦أ بالرسم البيانى التخطيطى المناسب الموضح بالشكل ١ — ٦ب . وهنا تظهر السمة الأساسية للجزء أ ، وهى القوة المؤثرة على الحلقة الدائرية ، بجلاء بدون الحاجة الى أية تفاصيل زائدة ..وتسمى مثل هذه الرسوم البيانية التخطيطية **برسوم بيان الجسم الحر** وسوف نستخدمها كثيرا فى هذا المجال .

من المعتاد تمثيل متجهات القوة بالرمز **F** حيث يستخدم الحرف الثخين لتنبيه القارىء الى أن الكمية التى يمثلها ذات اتجاه ومقدار معا* أما اذا لم يكن اتجاه القوة هاما فان مقدارها يمثل عادة بالرمز العادى F دون استخدام الحرف الثخين .

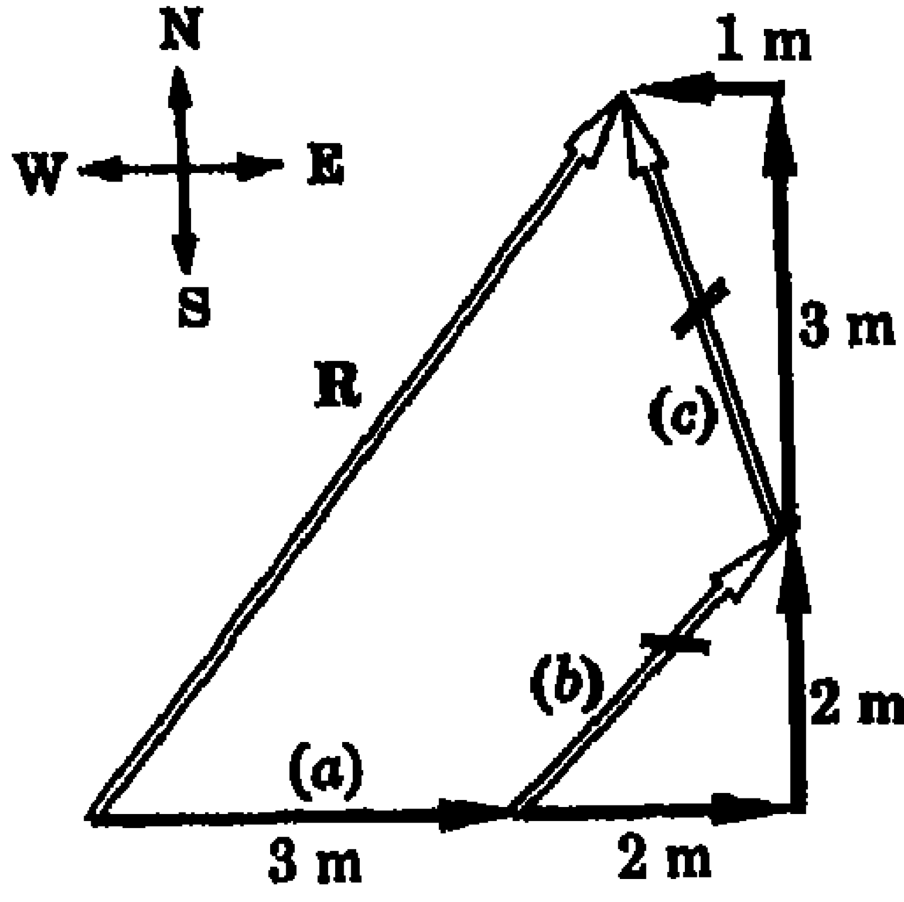
تعتبر سرعة الجسم المتحرك مثالا آخر للكميات الموجهة ، فنحن نقول أنه يتحرك بسرعة قدرها 20 mi/h (miles per hour) شرقا . وعليه فان هذه الكمية يمكن تمثيلها بسهم يشير الى الشرق .

شكل ١ — ٧
تحلل الازاحة 20 km فى الاتجاه الشمالى الشرقى الى مركبتى . الازاحة AB فى الاتجاه الشرق و BC فى الاتجاه الشمالى . المتجهان AB وBC هما مركبتا المتجه AC.



---

* عند كتابة رمز المتجه باليد على الورق أو السبورة يمكن استخدام طريقتين مختلفتين لتمييز المتجهات ، فأما أن يوضع خط مموج تحت الرمز هكذا F أو يوضع سهم فوقه هكذا $\vec{F}$.



شكل (١ – ٨)
يبين الشكل أن مجموع عدد معين من المتجهات يكافىء تماما مجموع مركبات هذه المتجهات .

وبالرغم من أن كثيرا من الكميات الأخرى يمكن تمثيلها بمتجهات ، فربما كانت لمتجهات الثلاثة السابق ذكرها – الازاحة ، القوة ، السرعة – أكثرها شيوعا . وسنرى فى الجزء التالى أن جميع المتجهات يمكن معاملتها بنفس الطريقة . ومن ثم ، فاذا تعلمنا كيف نتعامل مع متجهات الازاحة فان متجهات القوة والسرعة يمكن أن تعامل باسلوب مشابه ولن تمثل أية صعوبة .

١ – ٣ المركبات المتعامدة للمتجهات

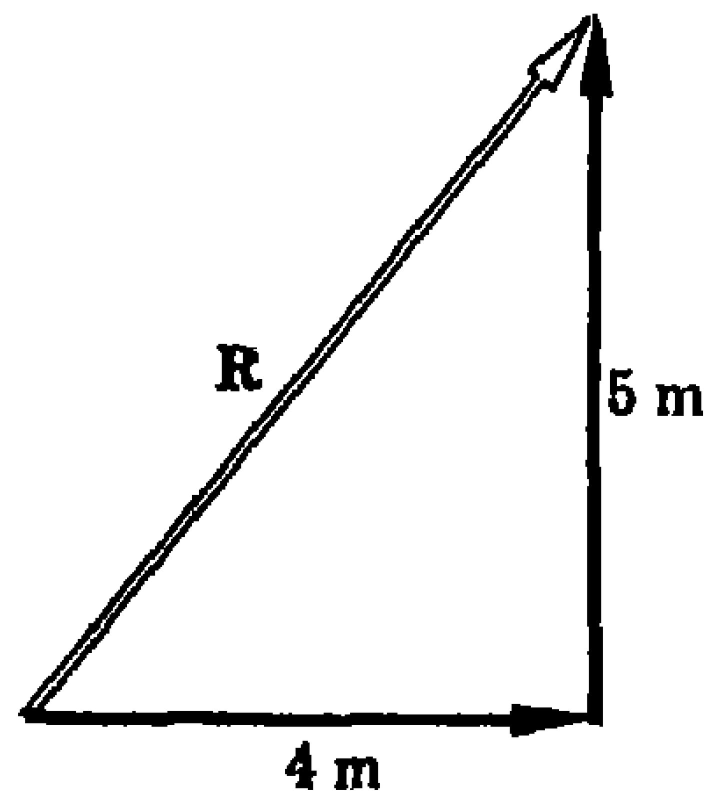
تعريف

لنفرض أن شخصا ما قد سافر مسافة 20 km فى الاتجاه الشمالى الشرقى . عندئذ يمكن رسم المتجه المناسب كما هو مبين بالشكل ١ – ٧ . ولكن من الواضح أن هذا الشخص يمكنه أن يصل الى نفس نقطة النهاية اذا سافر شرقا الى النقطة B ثم شمالا الى النقطة C مباشرة . من هذا نرى أن المتجهين الملونين ، عند جمعهما معا ، يكافئان المتجه 20 km وحده . تسمى المتجهات العديدة التى تعطى عند جمعها سويا متجها واحدا (مثل جمع المتجهين $\overline{AB}$ و $\overline{BC}$ ليعطيا $\overline{AC}$ **بمركبات** هذا المتجه . لنبحث الآن كيف يمكننا استخدام مفهوم المركبات لتبسيط عملية جمع المتجهات .

مثال توضيحى ١ – ٣ : تتبنى طريقة المركبات لجمع المتجهات على أساس أن أى متجه يمكن اعتباره كما لو كان مكونا من مركبات متعامدة كل على الأخرى . ولكى نبين كيف يمكن اجراء عملية جمع المتجهات لنرجع مرة ثانية الى متجهات الازاحة الموضحة بالشكل ١ – ٨ . يتجه المتجه الأول(a) بأكمله الى الشرق . ولكن المتجه الثانى (b) يتكون من جزئين كما هو مبين ، أولهما 2m تجاه الشرق والثانى 2 m تجاه الشمال* . وبنفس الطريقة فان المتجه (c) يتكون من مركبتين اولاهما 3m فى الاتجاه الشمالى وثانيتهما 1m فى الاتجاه الغربى . ولكن ازاحة قدرها 1m فى الاتجاه الغربى تعادل ازاحة قدرها 1 m مطروحة من الازاحة المتجهه الى الشرق . لهذا السبب فإن من الممكن تمثيل الإزاحة المتجهه الى الغرب بازاحة سالبة متجهة الى الشرق . بناء على ذلك سوف تمثل المركبة 1 m المتجهة الى الغرب بمتجه 1 m - فى الاتجاه الشرقى .

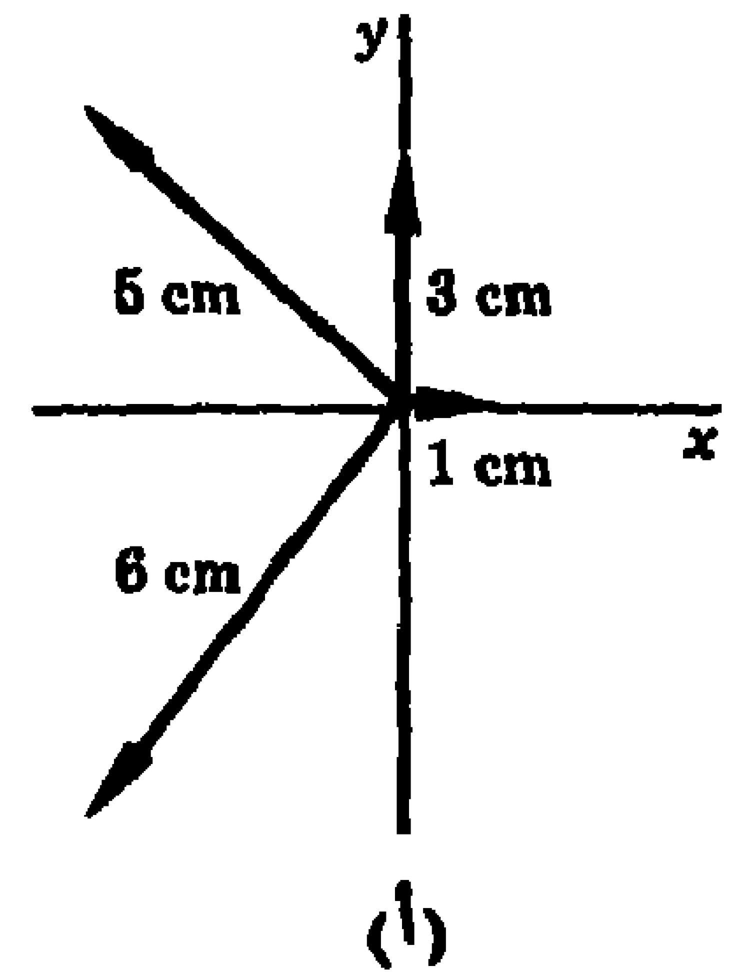
طريقة الحل : اذا أردنا ايجاد محصلة متجهات الازاحة الثلاثة هذه فاننا سنرى أن الحركة الكلية فى الاتجاه الشمالى هى $0+2+3 = 5m$ حيث يمثل الصفر حقيقة أن المتجه (a) فى الشكل ١ – ٨ ليس له مركبة فى الاتجاه الشمالى . بنفس الطريقة سنجد أن الحركة الكلية فى الاتجاه الشرقى هى $3+2-1 = 4m$. أى أننا قد تحركنا مسافة 4m شرقا ومسافة 5m شمالا . وعليه فان هاتين المركبتين لابد أن تكونا مركبتى المتجه المحصل . ويمثل الشكل ١ – ٩ هذا المتجه المحصل ويلاحظ أنه يساوى **R** فى

شكل (١ – ٩)
تعطى عملية جمع مركبات المتجهات المبينة بالشكل ١ – ٨ نفس المحصلة التى يمكن استنتاجها بجمع المتجهات ذاتها .



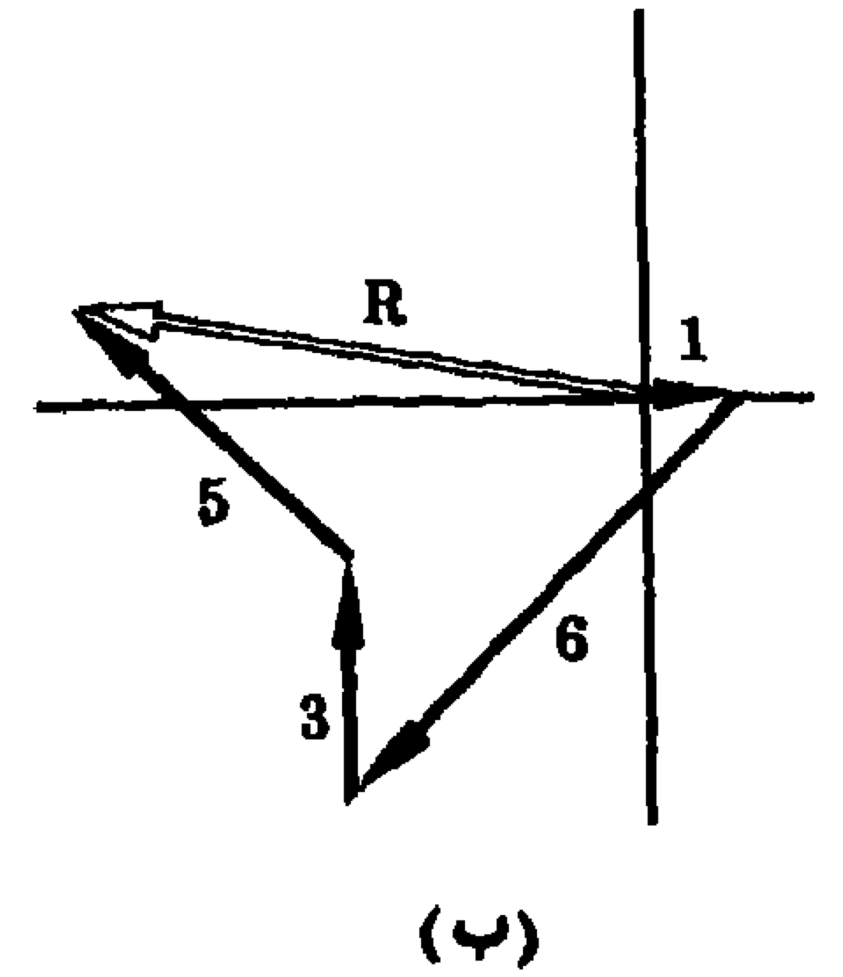
* 1m أطول قليلا من 1 yd ، بالضبط 1m = 3.28 ft .

الشكل ١ – ٨ . ومن الطبيعى أن يعطى مقدار المتجه المحصل R بالعلاقة $R = \sqrt{4^2 + 5^2}$.



(أ)

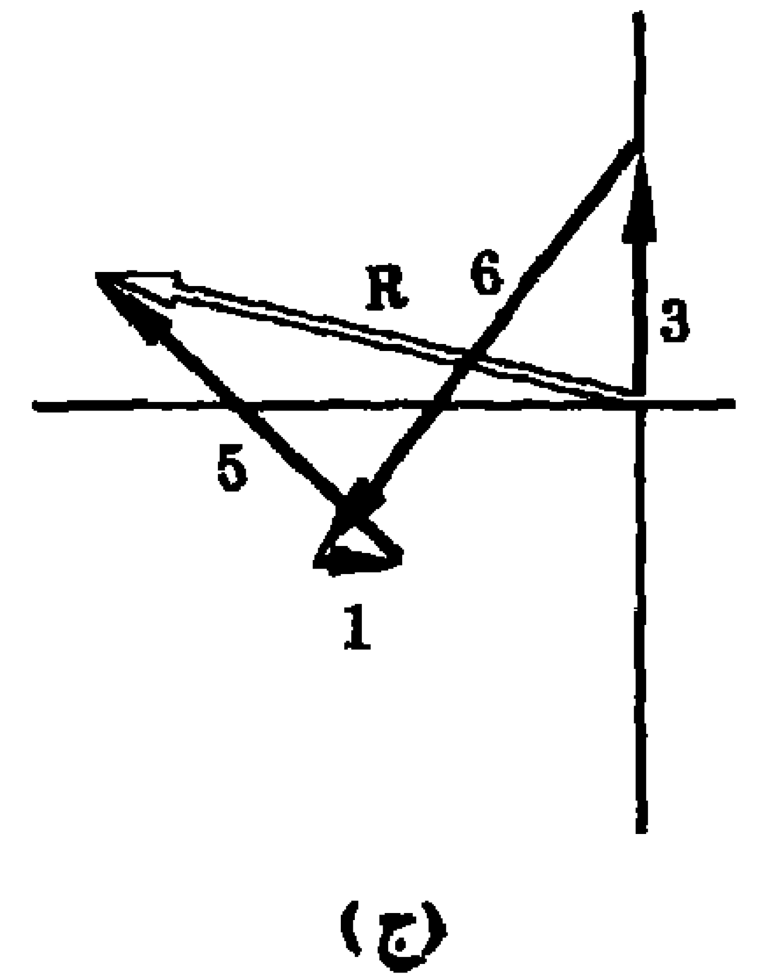
وحيث أن الشيء الوحيد المطلوب لتعيين R هو معرفة المسافة المقطوعة شرقا والمسافة المقطوعة شمالا فان الترتيب الذى تمت به الحركتان ليس مهما على الاطلاق . بناء على ذلك يمكننا القول بأن الترتيب الذى نجمع به المتجهات غير ذى أهمية ، اذ أننا ببساطة نحسب الحركة الكلية فى الاتجاه الشرقى والحركة الكلية فى الاتجاه الشمالى . هاتان الحركتان الكليتان هما اذن مركبتا الحركة المحصلة فى الاتجاه الشرقى والشمالى . لذلك يكون من المناسب عادة استبدال المتجه بمركبتيه . ولكى نبين أن هذا هو ما نفعله فعلا فى رسم بيان المتجهات فاننا قد شطبنا المتجه الأصلى مع استبقاء مركبتيه فقط ، وسنوضح ذلك بوضع علامة الشق الطولى على المتجه الأصلى الواجب استبداله بمركبتيه . لذلك فاننا قد وضعنا علامة الشق الطولى على المتجهين (b) و (c) فى الشكل ١ – ٨ ، وعند حساب الحركة المحصلة فاننا قد استبدلنا هذين المتجهين بمركباتهما .



(ب)

مثال توضيحى ١ – ٤ : اجمع متجهات الازاحة الموضحة فى الشكل ١ – ١٠ أ (تذكر أن 2.54 cm تكافىء 1 in) .

طريقة الحل : سنستخدم محاور الاحداثيات x, y لتمييز اتجاهاتنا وليس الشرق والغرب . ولكن الطريقة ستظل دون تغيير . وفى هذه الحالة سنجرى عملية جمع المتجهات بيانيا بالرغم من أننا سنرى فى الجزء التالى أن استخدام المركبات ربما كان طريقة أفضل لحل المسألة .



(ج)

شكل (١ – ١٠) يمكن جمع المتجهات الأربعة الموضحة فى (أ) كما هو مبين فى (ب) أو (جـ) للحصول على محصلتها . لاحظ أن الترتيب الذى تؤخذ به هذه المتجهات لا أهمية له .

يوضح الشكل ١ – ١٠ ب الجمع البيانى الفعلى لهذه المتجهات ، ويلاحظ أن المتجهات قد رسمت بحيث ينطبق ذيل المتجه مع رأس المتجه السابق وأن المتجه المحصل يمتد فى الاتجاه من نقطة البداية الى نقطة النهاية وليس العكس . وقد يتبادر الى الذهن ذلك السؤال المنطقى عما اذا كنا سنحصل على نفس المحصلة اذا جمعت المتجهات بترتيب مختلف . عند اختبار ذلك فى الجزء (جـ) من الشكل سنرى أن المحصلة لا تعتمد على الترتيب الذى رسمت به المتجهات . ولكننا لا يجب أن ندهش من أن هذا صحيحا اذ أن R تعطى ببساطة النتيجة النهائية لجميع مركبات الازاحة فى اتجاه المحورين x و y ، ولن تعتمد على الترتيب الذى تم به جمع هذه المركبات .

١ – ٤ الطرق المثلثية :

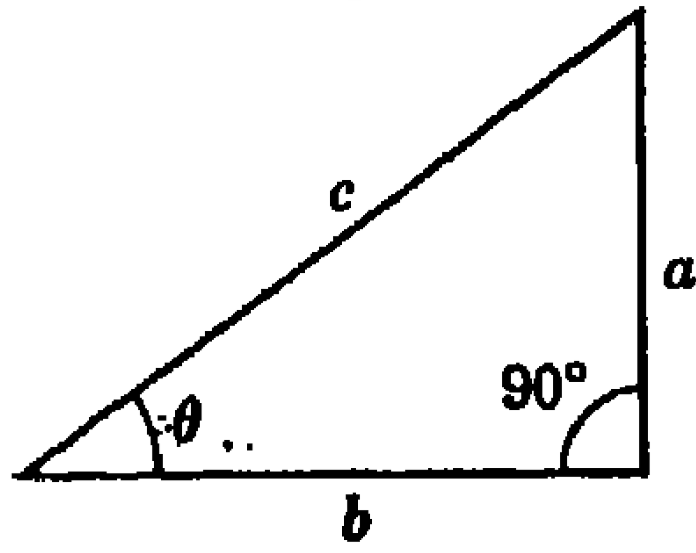
تعتبر الطريقة البيانية لجمع المتجهات طريقة مرضية اذا كان الشخص ماهرا فى الرسم ، صبورا ولديه مسطرة ومنقلة . ومع ذلك فمن المناسب للكثير منا أن يستعمل طريقة أسرع وأقل ارهاقا لجمع المتجهات . وفى الحقيقة فان تعلم قليل من القواعد الأساسية لعلم حساب المثلثات ، وهذا لن يستلزم الا دقائق معدودة ، يتيح لنا طريقة مناسبة جدا لجمع المتجهات . سنذكر الآن هذه القواعد .

شكل (١ – ١١)
تعرف النسبة المثلثية بدلالة المثلث قائم الزاوية كما يلى
$\sin\theta = a/c$, $\cos\theta = b/c$, $\tan\theta = a/b$.

$\sin\theta$

تعريف $\cos\theta = \frac{\prime}{\iota}$

$\tan\theta = \frac{a}{b}$



تعريف

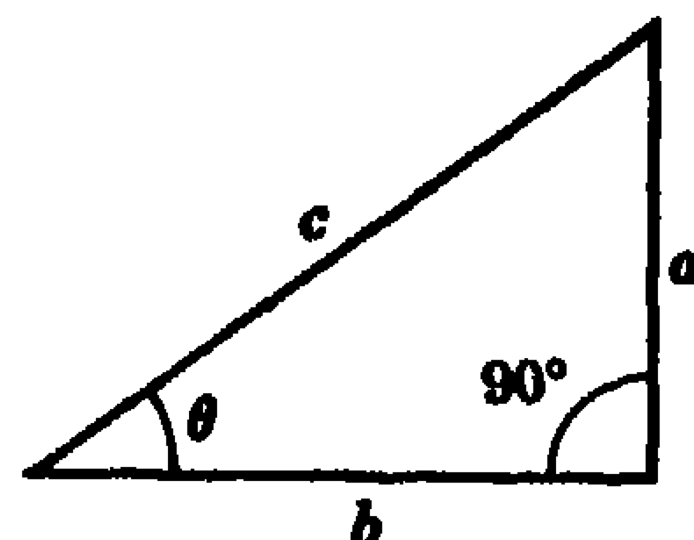
يمكن ايجاد المحصلة بسهولة بمعلومية مركبات المتجهات فى اتجاه الشرق والشمال (أو فى اتجاه المحورين x و y) ، وهذا واضح لأن المركبة x للمحصلة هى مجموع جميع المركبات x للمتجهات والمركبة y للمحصلة هى مجموع جميع المركبات y للمتجهات . وتظهر فعالية علم حساب المثلثات فى أنه يتيح لنا طريقة سهلة لايجاد مركبات المتجهات . هناك ثلاث كميات هامة متعلقة بالمثلثات قائمة الزاوية تسمى بالنسب المثلثية ، ولقد حسبت هذه الكميات ووضعت فى جداول النسب المثلثية ، ومن أمثلتها تلك الجداول المدرجة فى الملحق ٥ . والرجوع الى شكل ١ – ١١ يمكننا أن نتعرف على هذه الكميات . تعرف هذه النسب المثلثية الثلاث بالمعادلات التالية :

$$\sin\theta = \frac{a}{c} \qquad \cos\theta = \frac{b}{c} \qquad \tan\theta = \frac{a}{b}$$

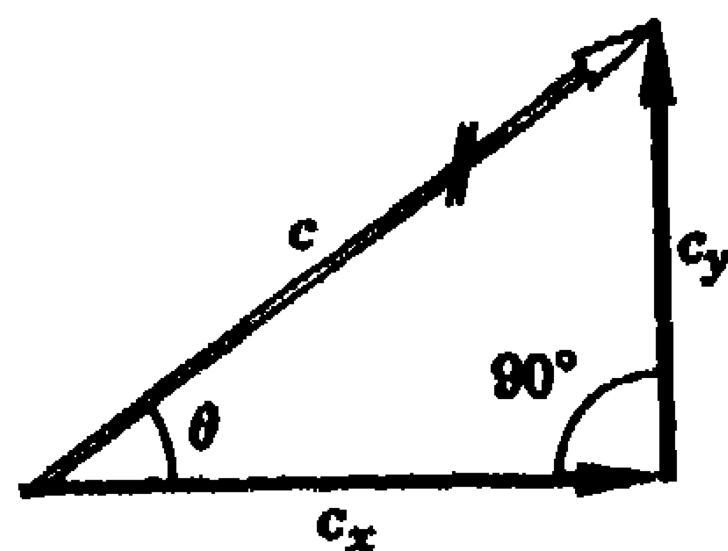
بالرجوع الى الشكل ١ – ١٢ واستخدام التعريفات السابقة يتضح لنا أن المركبة x للمتجه c وهى c_x تساوى $c\cos\theta$. بالمثل فان المركبة y للمتجه c وهى c_y تساوى $c\sin\theta$ فاذا علمنا قيمة كل من $\cos\theta$ و $\sin\theta$ يمكننا بسهولة ضرب هاتين القيمتين فى c لنحصل على مركبتى المتجه c فى الاتجاهين x و y ، ومن هنا تتضح أهمية جداول النسب المثلثية . لنوضح ذلك باستخدام بعض الأمثلة .

مثال توضيحى ١ – ٥ : اوجد مركبتى المتجه الموضح فى الشكل ١ – ١٣ .
طريقة الحل : هاتان المركبتان c_x و c_y موضحتان فى الشكل . باستخدام تعريف الجيب وجيب التمام والاستعانة بالشكل نجد أن :

$$\cos\theta = \frac{c_x}{20} \quad \text{و} \quad \sin\theta = \frac{c_y}{20}$$



تصبح



$c^2 = a^2 + b^2$ تصبح $c^2 = c_y^2 + c_x^2$

$\sin\theta = \frac{a}{c}$ $\sin\theta = \frac{c_y}{c}$

$\cos\theta = \frac{b}{c}$ تصبح $\cos\theta = \frac{c_x}{c}$

$\tan\theta = \frac{a}{b}$ $\tan\theta = \frac{c_y}{c_x}$

شكل (١ – ١٢)

المركبة y لهذا المتجه هي $c\sin\theta$ والمركبة x له هي $c\cos\theta$

$a = c\sin\theta$ $c_y = c\sin\theta$

$b = c\cos\theta$ تصبح $c_x = c\cos\theta$

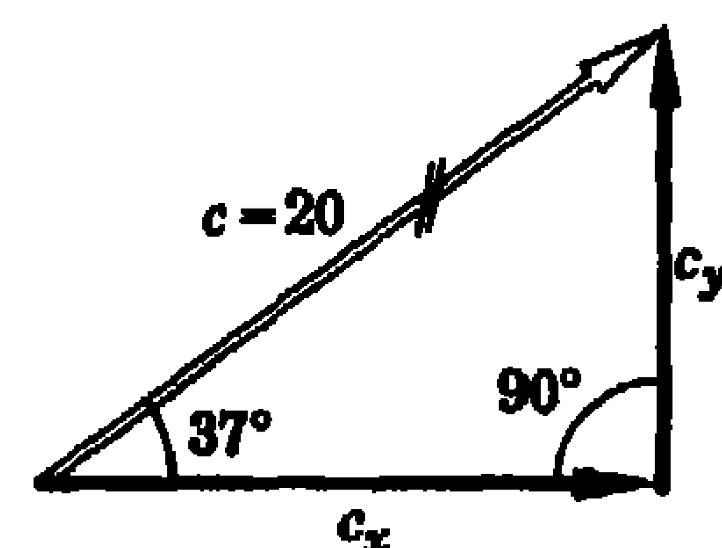
$a = b\tan\theta$ $c_y = c_x\tan\theta$

شكل (١ – ١٣)

المركبة y لمتجه مقداره 20 وحدة هي $(20)(\sin 37°)$ أو 12 ، أما المركبة x له فهي $(20)(\cos 37°)$ أو 16 .

$c_x = 20\cos\theta = 20(0.80) = 16$

$c_y = 20\sin\theta = 20(0.60) = 12$



حيث $\theta = 37°$ فى هذه الحالة . باستخدام جداول النسب المثلثية (أو الحاسب) نجد أن $\sin 37° = 0.60$ و $\cos 37° = 0.80$. بالتعويض عن هذه القيم سنجد أن $c_x = 16$ و $c_y = 12$.

مثال توضيحى ١ – ٦ : اجمع المتجهات الموضحة بالشكل ١ – ١٤أ ، باستخدام طريقة المركبات .

طريقة الحل : لقد رمزنا ، كما هو موضح ، الى المتجهات بالرموز a ، b ، c ، d . يلاحظ أن كلا من المتجهين a و b له مركبة واحدة تختلف عن الصفر . لايجاد مركبتى المتجه c يمكن الاستعانة بالجزء ب من الشكل . وحيث أن $\sin\theta = $ (opposite side) hypotenuse يمكننا ايجاد المركبة y للمتجه :

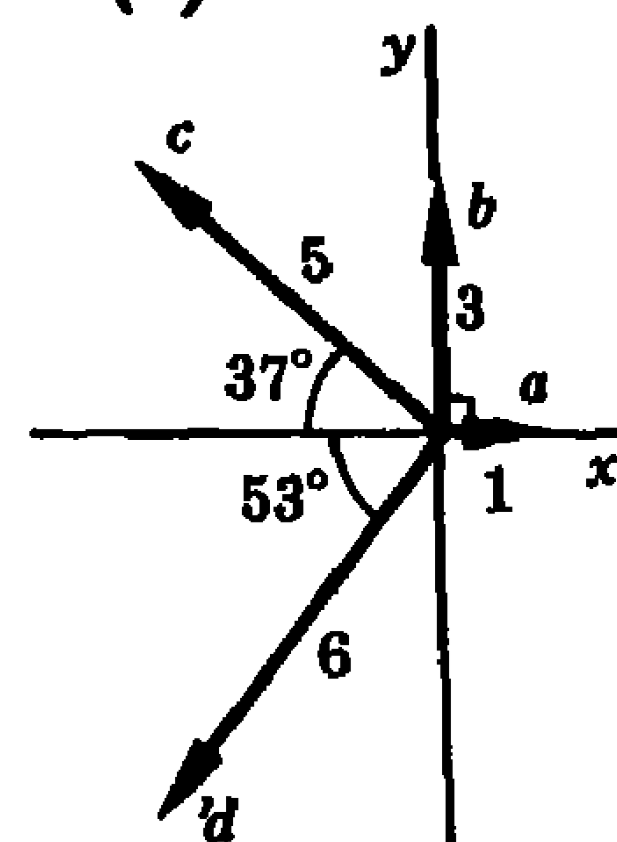
$$y \text{ component} = (\text{hypotenuse})(\sin 37°) = (5)(0.60) = 3$$

بالمثل فان $\cos\theta = $ (adjacent side)/hypotenuse ، وهذا يعطى

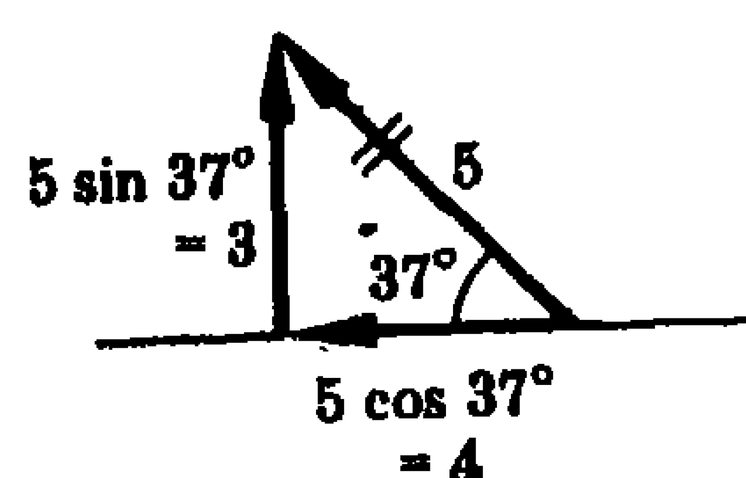
$$\text{Adjacent side} = (5)(\cos 37°) = 4$$

شكل (١ – ١٤)

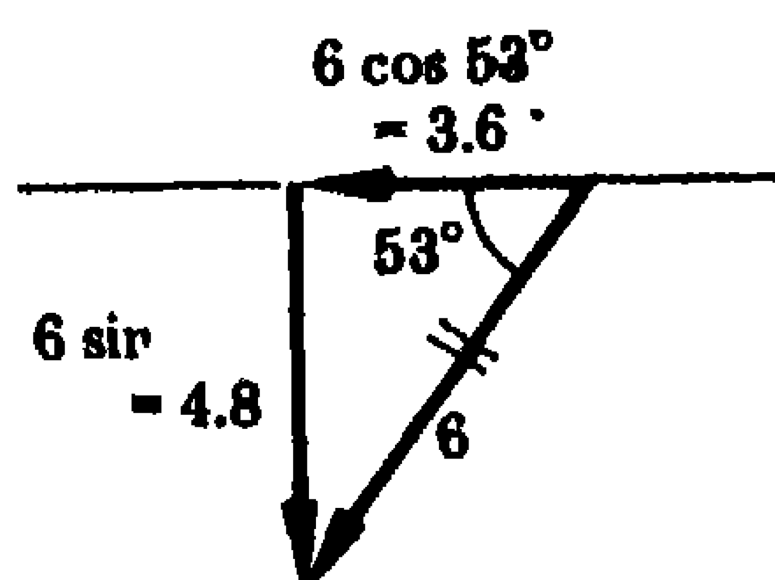
يمكن جمع المتجهات الموضحة فى (أ) باستخدام طريقة المركبات لتعطى المحصلة الموضحة فى (د) .



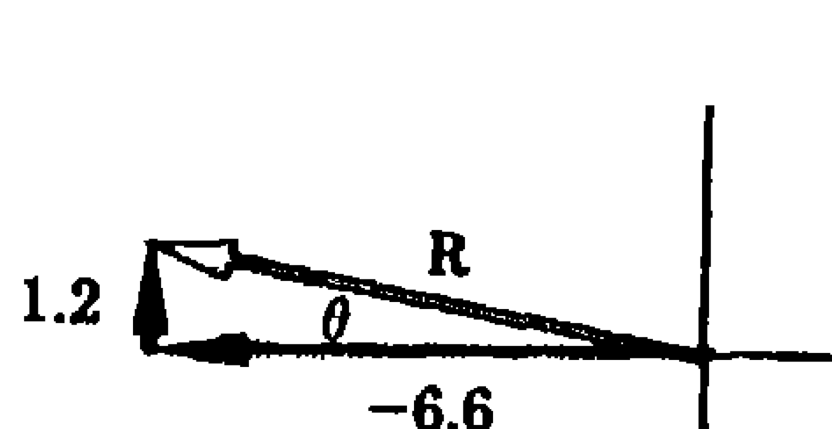
(أ)



(ب)



(ج)



(د)

ولكن هذا مقدار المركبة x . ولكن هذه المركبة سالبة لأنها تشير الى الاتجاه $x-$. وعليه فان مركبة المتجه الذى مقداره 5 وحدات هى $4-$.

يمكن استخدام طريقة مشابهة ، وهى الموضحة فى الشكل ١ – ١٤جـ لايجاد مركبتى المتجه الذى مقداره 6 وحدات . مركبتى هذا المتجه فى الاتجاهين x، y هما $3.6-$ و $4.8-$ على الترتيب . وهكذا فان مركبات جميع المتجهات قد أصبحت معلومة الآن . وحتى نعتاد على هذه الطريقة من المفيد ترتيب المتجهات فى جدول كالتالى :

المركبة y	المركبة x	المتجه
$a_y = 0$	$a_x = +1.0$	a
$b_y = +3.0$	$b_x = 0$	b
$c_y = +3.0$	$c_x = -4.0$	c
$d_y = -4.8$	$d_x = -3.6$	d
$R_y = +1.2$	$R_x = -6.6$	المحصلة

يلاحظ عند اعداد هذا الجدول أن المركبات التى تشير الى الاتجاه السالب للمحورين x و y قد اعتبرت سالبة . وحيث أن مركبتى المحصلة قد أصبحت معلومة الآن فان من الممكن رسمها كما هو موضح بالشكل ١ – ١٤ د . وباستخدام نظرية فيثاغورث نجد أن

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(-6.6)^2 + (1.2)^2} = 6.7$$

ولكن حل المسألة ليس كاملا حتى الآن اذ من الضرورى ايجاد قيمة الزاوية θ فى الشكل ١ – ١٤ د . يمكن تحقيق ذلك بسهولة باستعمال تعريف الظل . اذن :

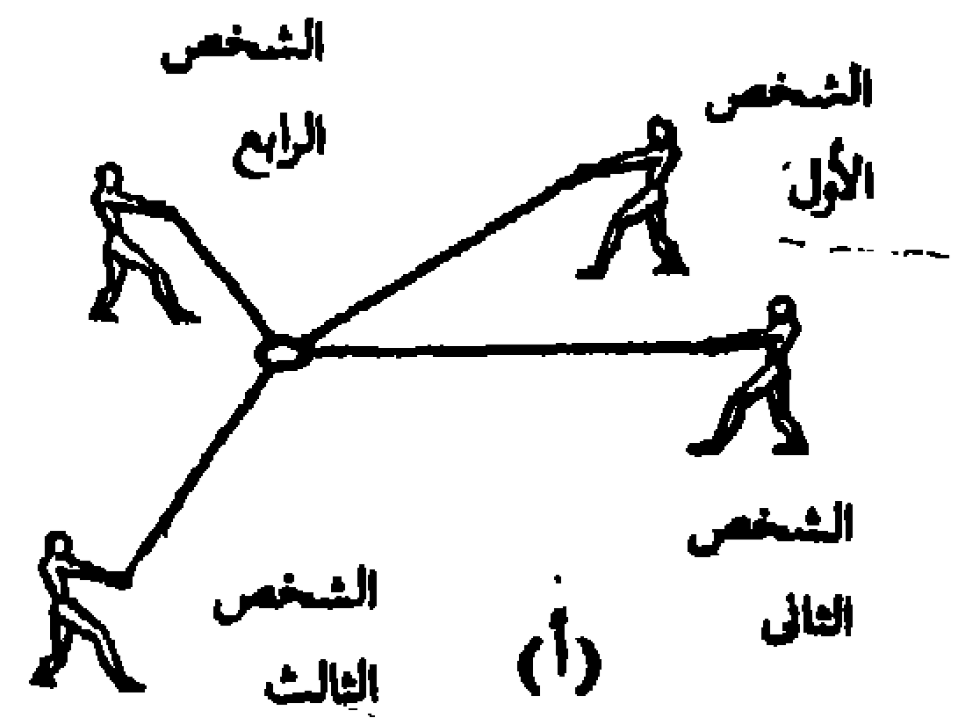
$$\tan\theta = \frac{R_y}{R_x} = \frac{1.2}{6.6} \approx 0.18$$

حيث تقرأ العلامة $\approx$ هكذا « تساوى تقريبا » . باستخدام جدول النسب المثلثية سنجد أن الزاوية التى ظلها 0.18 تساوى تقريبا $10.5°$. وعليه فان $\theta = 10.5°$ فى الاتجاه الشمالى الشرقى . وللحصول على قيمة أكثر دقة يمكننا استخدام العملية المسماة **الاستكمال من الداخل** ، أو يمكننا الرجوع الى جداول أكثر دقة مثل الجداول الموجودة فى الكتيبات المساعدة* ، كذلك يمكن استعمال الحاسبات اليدوية لايجاد الدوال المثلثية .

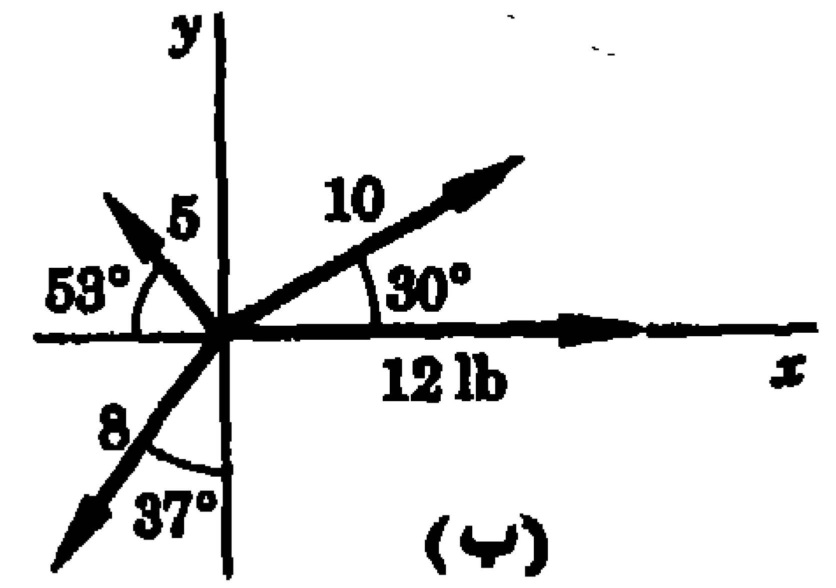
* يحتوى الكتاب « دليل الكيمياء والفيزياء » (شركة كيميكال رابر للنشر) على مجموعة قيمة من الجداول الرياضية ، يحتوى على ثروة من المعلومات الأخرى ،ويمكن للكثيرين من العاملين فى مجالات العلم المختلفة الرجوع اليه .

١ – ٥ : جمع القوى

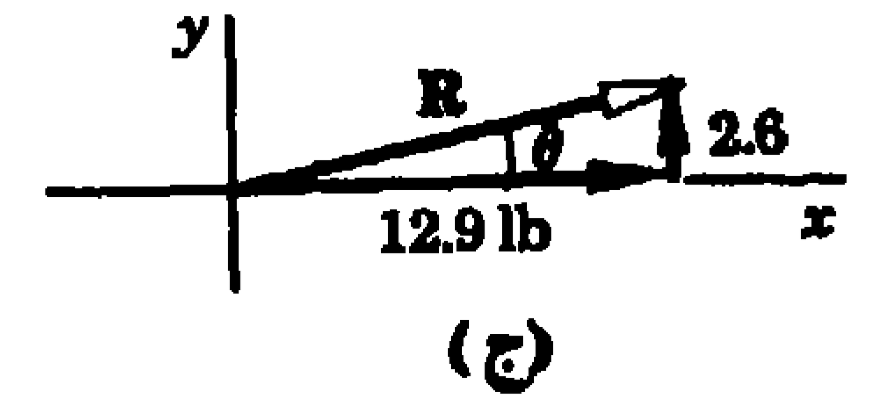
من السهل علينا الآن جمع مختلف أنواع المتجهات ، ونحن نعلم أن الترتيب الذى تتم به عملية جمع المتجهات ليس مهما على الاطلاق . كذلك فاننا قد فهمنا طريقة مناسبة جدا لجمع المتجهات وهى طريقة المركبات المثلثية المتعامدة .



مثال توضيحى ١ – ٧ : لندرس المسألة الموضحة فى شكل ١ – ١٥ أ ، يمثل الشكل المسقط الرأسى لمجموعة من الناس يجذبون قائما رأسيا بواسطة الحبال . ويمثل الجزء ب من الشكل القوة المؤثرة على القائم الرأسى لكل حبل مقدرة بالباوند . المطلوب ايجاد المحصلة النهائية للقوى المؤثرة على القائم بواسطة الحبال .



طريقة الحل : يمثل الجدول التالى مركبات القوى المعنية حيث اعتبر المتجه 12 lb أولا ثم أخذت المتجهات الأخرى بالترتيب فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للشكل (ليس هناك سبب محدد لذلك اذ أن الترتيب غير هام)



شكل (١ – ١٥)
يمكن الحصول على المحصلة الموضحة فى (جـ) بجمع المتجهات الموضحة فى (ب)

المتجه ، باوند	المركبة x باوند	المركبة y باوند
12	12.0	0.0
10	8.7	5.0
5	−3.0	4.0
8	−4.8	−6.4
المحصلة	12.9	2.6

باستخدام نظرية فيثاغورث نجد أن :

$$R = \sqrt{(2.6)^2 + (12.9)^2}\ \text{lb} = 13.2\ \text{lb}$$

يوضح الجزء جـ من شكل ١ – ١٥ المحصلة . كذلك فان $\tan\theta = 2.6/12.9 \approx 0.20$ ومنه نجد أن $\theta = 11.5°$.

من الضرورى دائما فحص رسم بيان المتجهات للتأكد من أنه ليس هناك خطأ فى المقدار أو الاتجاه . وحيث أن القوتين 10 lb و 12 lb تجذبان أساسا فى الاتجا +x والقوتين 5 lb و 8 lb تحاول كل منهما ان تتزن مع الأخرى ، فمن المعقول أن تكون محصلة جذب القائم فى اتجاه **R** الذى تم ايجاده .

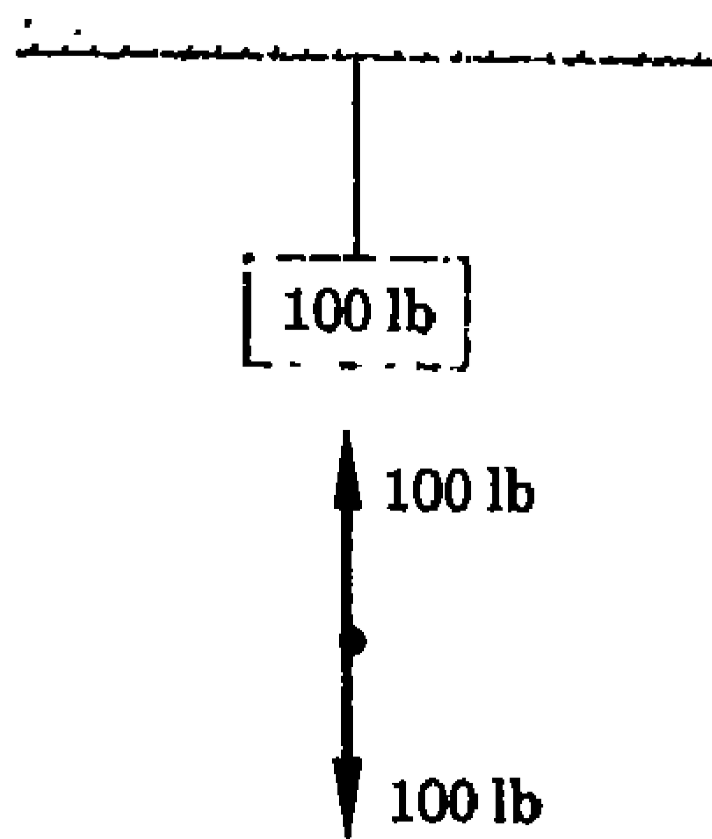
بهذا تكتمل مناقشتنا لطرق جمع الكميات ذات الاتجاه أى المتجهات ونحن الآن مستعدون لتطبيق هذه الطرق فى المسائل المتعلقة بتأثير القوى المؤثرة على الأجسام . فى الجزء الباقى من هذا الفصل سنهتم فقط بتلك الحالة التى تتزن فيها القوى المؤثرة على الأجسام . أما القوى غير المتزنة فانها تسبب حركة الجسم وهو ما سنناقشه فى فصول قادمة .

١ – ٦ الأجسام فى حالة السكون :

لكى يظل الجسم فى حالة السكون لابد أن يتعادل تأثير القوى الدافعة تماما مع تأثير القوى الجاذبة . ومع ذلك فحتى اذااتزنت جميع القوى المؤثرة على الجسم فان هذه القوى قد تسبب دوران الجسم (وهذا ماسوف نناقشه بالتفصيل فى الفصل الثامن) . ومع ذلك فاننا سنحصر اهتمامنا الآن فقط فى تلك الحالة التى لا يتعرض فيها الجسم لأية قوى يمكن أن تسبب دورانه . أى أننا سوف ندرس الاجسام الساكنة والتى تستمر فى حالة السكون .

تعريف

يقال أن الجسم فى حالة **توازن** اذا كان ساكنا ومستمرا فى السكون (ليس من الضرورى أن يكون الجسم ساكنا لكى يكون فى حالة التوازن ، ولكننا سنناقش هذه الحقيقة بالتفصيل فى الفصل الثالث) . فى كثير من الأحيان يكون واضحا لنا لماذا لا يتحرك الجسم ، فعلى سبيل المثال فان الجسم الموضح فى شكل ١ – ١٦ والذى يزن 100 lb ساكن لأن الحبل المعلق فى السقف يمنعه من السقوط .



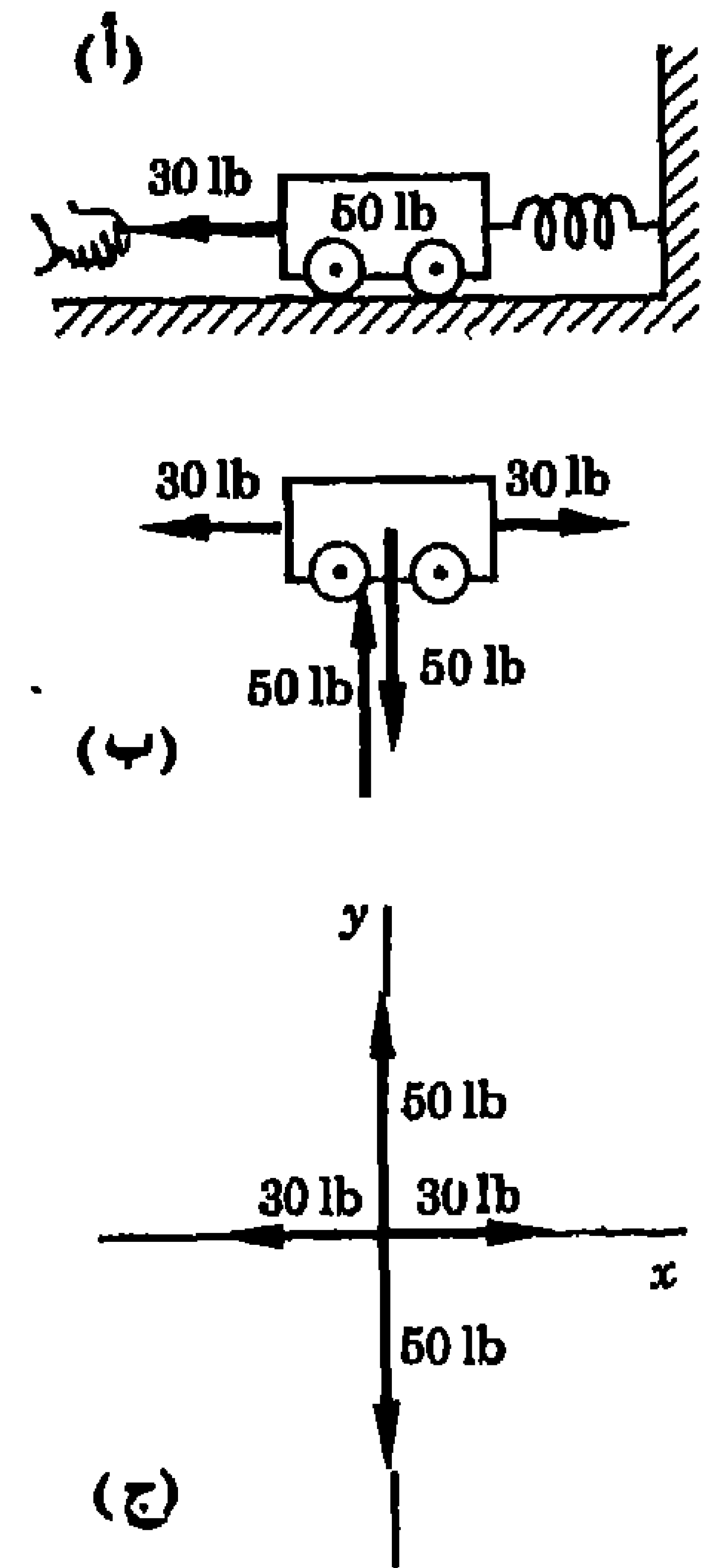
شكل (١ – ١٦)
تؤثر قوتان على الجسم الذى يزن 100 lb وهما شد الجاذبية الأرضية الى أسفل وجذب الحبل ومقداره 100 lb الى أعلى .

عند فحص هذا الجسم بتفصيل أكثر سنرى أن هناك **قوتين** تؤثران عليه ، ونحن لانحتاج فقط الا أن نحمل هذا الجسم فى يدنا لنعلم أن هناك شيئا ما يجذبه فى خط مستقيم نحو الأرض . هذا الجذب الى أسفل – أو القوة – الذى يؤثر على الجسم هو نتيجة للتجاذب التثاقلى للأرض بالنسبة له . ولن نحاول الآن تفصيل هذه النقطة ولكننا سنناقشها بكثير من التفصيل فى فصل لاحق . وفى هذا المقام فاننا سنستعمل تلك الحقيقة التى تنص على أن الجسم الساكن على سطح الأرض ينجذب نحوها بقوة نسميها **وزن** الجسم . هذه القوة ممثلة فى الشكل ١ – ١٦ بمتجه مقداره 100 lb متجها الى أسفل . وسوف نشير الى هذه القوة فى أحوال كثيرة **بجذب** الجاذبية الأرضية .

تبين المشاهدات التجريبية أن هذا الجسم لابد أن يسقط نحو الأرض مالم يؤثر عليه دفع أو شد الى أعلى بقوة مقدارها 100 lb . وفى حالتنا هذه يقوم الحبل بشد الجسم الى أعلى بقوة تساوى وزنه وهو 100 lb ، وتمثل هذه القوة فى الشكل ١ – ١٦ بالمتجه 100 lb الى أعلى . بناء على ذلك فنحن نعلم من هذه التجربة أنه لكى لا يتحرك الجسم الى أعلى أو الى أسفل لابد أن تتزن القوى الرأسية المؤثرة على الجسم . وفى هذه الحالة يتعادل الشد فى الحبل وهو 100 lb الى أعلى تماما مع القوة 100 lb الى أسفل الناتجة من التجاذب التثاقلى للأرض .

لاحظ أننا نتكلم فقط عن القوى المؤثرة على الجسم المعنى ، وبالذات عن جسم معلق فى نهاية حبل . هناك بالطبع قوى أخرى تؤثر على الأجسام المبينة فى شكل ١ – ١٦ ، فهناك مثلا القوى التى يؤثر بها السقف على الحبل . ولكننا ندرس الآن

فقط تلك القوى المؤثرة على الجسم المعلق فى الحبل . وتبين التجربة أن الجسم سوف يستمر معلقا فى حالة السكون اذا كانت محصلة جميع القوى التى تجذب الجسم الى أعلى مساوية تماما لمحصلة جميع القوى التى تجذب الجسم الى أسفل . وحيث أننا نهتم فقط بالقوى المؤثرة على الجسم ، فمن المناسب أن نرسم رسم بيان الجسم الحر كما هو موضح فى الجزء السفلى من شكل ١ – ١٦ الذى يبين الأساسيات فقط وهى القوى المؤثرة على الجسم . ويلاحظ من الوهلة الأولى أن القوة المتجهة الى أعلى تتزن مع القوة المتجهة الى أسفل ولذلك فان الجسم لا يتحرك .



شكل (١ – ١٧)
عربة صغيرة وزنها 50 lb مثبتة فى الحائط بواسطة زنبرك . هناك حبل يجذبها الى اليسار بقوة مقدارها 30 lb . يمثل رسم بيان الجسم الحر (جـ) جميع القوى الأربع المؤثرة على الجسم . وحيث أن العربة الصغيرة فى حالة توازن فان القوى الأربع متزنة .

لندرس الآن العربة الصغيرة المبينة فى شكل ١ – ١٧ أ ، وتزن هذه العربة 50 lb . هناك شخص ما يجذب العربة الى اليسار بواسطة حبل متصل بها بقوة قدرها 30 lb بينما يجذبها الزنبرك المثبت فى الحائط الى اليمين . سنفترض كتقريب مناسب أن احتكاك العجلات يمكن اهماله . ما هى القوى المؤثرة على هذا الجسم ؟

أولا هناك شد الجاذبية الأرضية الى أسفل ومقداره 50 lb . ولكن لابد أن تتزن هذه القوة الى أسفل مع قوة أخرى مساوية لها متجهة الى أعلى والا سقطت العربة الى أسفل . من الواضح أن الطريق الذى تستقر عليه العربة لابد أن يدفعها بقوة تساوى تماما 50 lb بحيث تتزن مع وزن العربة . ومرة أخرى لابد أن تتزن (أو تتساوى) القوى المؤثرة الى أعلى مع القوة المؤثرة الى أسفل حتى تظل العربة ساكنة

هناك أيضا قوتان أخريان تؤثران على العربة ، أولى هاتان القوتان هى القوة التى يجذب الحبل بها العربة الى اليسار ومقدارها 30 lb . ولكن التجربة تخبرنا أنه اذا لم يتزن جذب الحبل مع قوة أخرى مساوية له تجذب العربة الى اليمين فان العربة لابد ان تتحرك الى اليسار . بناء على ذلك فلكى تظل العربة ساكنة لابد ان يجذب ان الزنبرك هذه العربة الى اليمين بقوة مقدارها 30 lb .

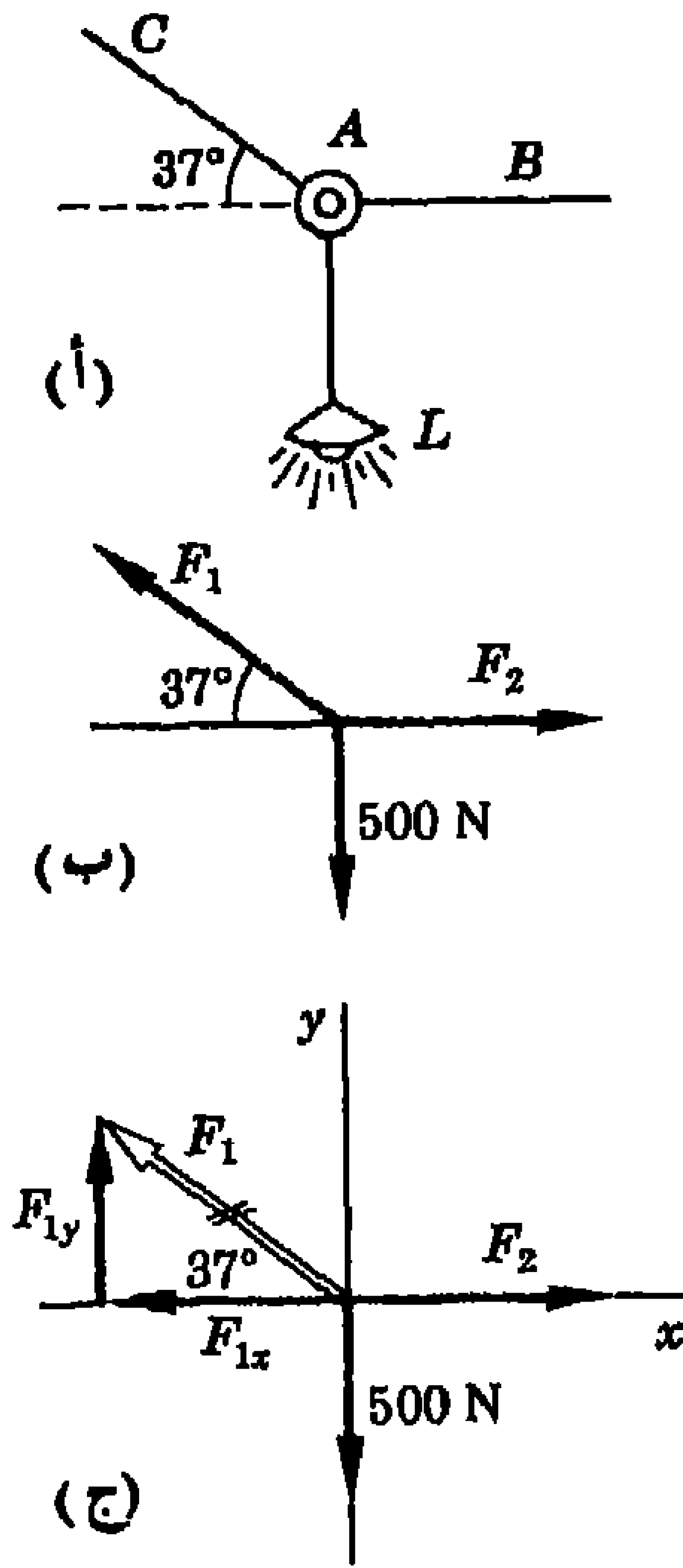
يتضح اذن من خبرتنا العامة أن الجسم المستمر فى حالة السكون لابد ألا تؤثر عليه أية قوى غير متزنة . أى أنه من الضرورى أن تتعادل جميع القوى المؤثرة عليه الى أعلى مع القوة المؤثرة عليه الى أسفل . كذلك فان القوى التى تجذبه الى اليمين لابد ان تساوى القوى التى تجذبه الى اليسار . وفى الحقيقة فان صافى القوة فى الاتجاه الثالث ، والتى قد تحاول جذب العربة الى الداخل أو الخارج بالنسبة لمستوى الصفحة فى شكل ١ – ١٧ ، لابد ان تساوى صفرا . يمكننا اذن تمثيل القوى المؤثرة على العربة والموضحة فى شكل ١ – ١٧ أ رسم بيان الجسم الحر الموضح فى شكل ١ – ١٧ جـ . لاحظ أن القوة المحصلة المؤثرة على العربة تساوى صفرا .

١ – ٧ : الأجسام المقيدة بحبال أو أسلاك :

لندرس الآن مثالا أكثر تعقيدا لنرى كيف يمكن استخدام قاعدة اتزان القوى .

مثال توضيحى ١ – ٨ : اعتبر مصباح الطريق المعلق بواسطة الاسلاك والموضح فى شكل ١ – ٨ أ،وزن المصباح 500 N (Newton)* .

طريقة الحل : لاحظ باهتمام أننا سوف نتكلم الآن عن القوى المؤثرة على المصباح . هناك بعض القوى المؤثرة على كثير من الأجسام الموجودة فى الشكل ، ولكننا سنهتم فقط بالقوى المؤثرة على المصباح . تؤثر على المصباح قوتان فقط وهما شد الجاذبية الى أسفل ومقداره 500 N وجذب السلك AL الى أعلى ومقداره 500 N وهو يتزن مع القوة الأولى . لاحظ أن القوتين المؤثرتين على المصباح متزنتان تماما ، لذلك فان المصباح يظل فى حالة السكون .



شكل (١ – ١٨)
رسمت القوى المؤثرة عند نقطة اتصال الأسلاك الثلاثة والموضحة فى (أ) فى الجزء (ب) . فى الجزء (جـ) حسبت مركبات هذه القوى استعدادا لكتابة علاقة التوازن لنقطة الاتصال .

لندرس الآن القوة المؤثرة على طول السلك AL. وحيث أن الأرض تجذب المصباح الى أسفل بقوة قدرها 500 N فان المصباح بدوره يزن 500 N ويؤثر على الحبل AL بقوة قدرها 500 N الى أسفل كذلك فان الحلقة الموجودة عند النهاية العليا A لابد أن تجذب السلك AL الى أعلى بقوة قدرها 500 N حتى تمنعه من السقوط . لذلك فان السلك AL يستمر فى حالة السكون لأن القوة 500 N الى أسفل والمؤثرة عند احدى نهايتى السلك تتزن مع القوة 500 N الى أعلى عند النهاية الأخرى له .

لننظر الآن الى الحلقة الموجودة عند النقطة A . هناك ثلاثة أشياء تجذب هذه الحلقة وهى السلك AL والسلك AC والسلك AB . هذه القوى الثلاث المؤثرة على الحلقة موضحة فى الشكل ١ – ٨ أ . لاحظ أن هذه القوى ليست على هذه الدرجة من البساطة كتلك القوى المؤثرة على السلك أو المصباح لانها لاتؤثر فى اتجاه نفس الخط المستقيم . ومع ذلك فان هذا ليس هاما لأننا نعلم كيف نحلل متجهات القوة الى مركباتها

يمكن اعتبار جذب السلك AC مكونا من جذبين ، جذب الى أعلى وجذب الى اليسار وهذا موضح فى شكل ١ – ١٨ جـ حيث شطب المتجه الأصلى F_1 لنبين أننا قد استعضنا عنه بمركبتيه . والآن أصبح واضحا أن القوتين لابد أن تتزنا ، وعليه فان القوة 500 N الى أسفل تتزن كلية مع مركبة القوة F_1 الى أعلى وهى بالتحديد F_{1y} . أى أن :

$$F_{1y} = 500\ \text{N} \qquad (١ - ٢)$$

بالاضافة الى ذلك فان جذب القوة F_2 الى اليمين يجب ان يتزن مع جذب القوة F_{1x} الى اليسار . من هذا نجد أن :

---

* النيوتن (Newton) هو وحده قوة مثل الباوند (Pound) وسوف نتعرف عليه بتفصيل أكثر فى الفصل الثالث . أما الآن فيكفينا أن نعرف 1 lb = 4.45N . وعليه فان الجسم المعنى يزن 500 N مايعادل 112 lb .

$$F_{1x} = F_2 \qquad (١ - ٣)$$

ولسوء الحظ فان F_{1x} لازالت غير معلومة ، لذلك فلن يمكن حساب F_2 الا بعد ايجاد F_{1x} . ومع ذلك فيمكن القيام بذلك بسهولة اذا لاحظنا أن تعريف ظل الزاوية فى هذه الحالة يعطينا

$$\tan 37° = \frac{F_{1y}}{F_{1x}}$$

أو :

$$F_{1x} = \frac{F_{1y}}{\tan 37°} = \frac{500\ \text{N}}{0.75} = 670\ \text{N} \qquad (١ - ٤)$$

حيث استخدمنا حقيقة أن ظل الزاوية 37° هو 0.75 . ومن المعادلة (١ - ٣) نجد كذلك أن $F_2 = 670\ \text{N}$.

واذا أردنا ايجاد الشدّ فى السلك AC وليس مركبتاه يمكننا أن نكتب :

$$F_1 = \sqrt{F_{1x}^2 + F_{1y}^2}$$

$$= \sqrt{(670\ \text{N})^2 + (500\ \text{N})^2} = 830\ \text{N}$$

وبطريقة أخرى يمكننا أن نلاحظ بكثير من البساطة أن تعريف جيب الزاوية يمكن وضعه فى هذه الحالة على الصورة :

$$\sin 37° = \frac{F_{1y}}{F_1}$$

ومنه نجد أن :

$$F_1 = \frac{F_{1y}}{\sin 37°} = \frac{500\ \text{N}}{0.60} = 830\ \text{N} \qquad (١ - ٥)$$

أي أننا قد تمكنا من ايجاد الشد فى كل حبل والقوى المؤثرة على مختلف الاجسام بتطبيق فكرة اتزان القوى

١ - ٨ الشرط الأول للتوازن

لكى يستمر الجسم فى حالة السكون لابد من تحقق شرطين أساسيين ، وقد استخدمنا الشرط الأول للتوازن فى الأجزاء السابقة ، أما الشرط الثانى فانه يتعلق بدوران الجسم وسيناقش فى الفصل الثامن وبفرض عدم دوران الجسم فانه سيستمر ساكنا بشرط اتزان القوى المؤثرة على هذا الجسم . بناء على ذلك يمكننا صياغة الشرط الأول للتوازن على هذه الصورة المبسطة . لابد أن تتزن القوى المتجهة الى أعلى مع القوى المتجهة الى أسفل ، وايضا لابد أن تتزن القوى المتجهة الى اليسار مع القوى المتجهة الى اليمين . وبالرغم من أن ذلك صحيح بالتأكيد ، وبالرغم أيضا من أن ما نعنيه واضح لنا كل الوضوح فان هذه الصيغة ليست دقيقة ومضبوطة تماما من الناحية العلمية ولكن من الممكن تحسينها اذا عبرنا عنها بدلالة اتجاهات الاحداثيات الثلاثة x و y و z.

ما نعنيه فى الحقيقة هو انه اذا أثرت قوة مقدراها 20 lb على الجسم فى الاتجاه الموجب من المحور x فلابد أن تؤثر عليه قوة أخرى مقدارها 20 lb فى الاتجاه السالب من المحور x حتى يكون الجسم فى حالة توازن . واذا اتفقنا على تسمية القوة المؤثرة على الجسم فى الاتجاه الموجب بالمقدار 20+ والقوة المؤثرة عليه فى الاتجاه السالب بالمقدار 20- فسيمكننا صياغة شرطنا بمنتهى البساطة بأن نقول أن « مجموع القوى فى اتجاه المحور x تساوى صفرا» وباستخدام الرمز الرياضى ΣF_x بدلا من العبارة « مجموع القوى فى اتجاه المحور x » فان الشرط الأول الضرورى للتوازن يمكن كتابته على الصورة* :

عند التوازن : $\Sigma F_y = 0 \qquad \Sigma F_x = 0$ (١ - ٦ أ)

يمكن تبسيط هاتين المعادلتين أكثر من ذلك بملاحظة أنها تنص على مجرد أن محصلة جميع القوى المؤثرة على الجسم لابد أن تساوى صفرا . وهذا يعنى أن مجموع كل القوى الموجهة المؤثرة على الجسم يساوى صفرا . وبالتالى فان :

$$\Sigma \mathbf{F} = 0$$ (١ - ٦ ب)

تمثل المعادلتان (١ - ٦) الصيغة الرياضية للشرط الأول للتوازن . ومن الضرورى أن نتذكر دائما أنها تنطبق على جسم واحد معزول فى وقت معين . وهى تنطبق على القوى المؤثرة على ذلك الجسم ، ولكننا يجب أن نكون مستعدين دائما لأن نقول بأى طريقة تؤثر كل قوة على الجسم المعزول للدراسة . فهى يمكن أن تكون شد الحبل أو جذب الجاذبية أو دفع المنضدة أو دفع العمود أو أى طريقة فيزيائية مشابهة لتأثير القوة على الجسم المعنى .

١ - ٩ حل المسائل فى علم الاستاتيكا

يمكن بقليل من التمرين أن يصبح حل كثير من المسائل فى علم الاستاتيكا (أى دراسة الاجسام فى حالة السكون) باستخدام المعادلات (١ - ٦) اسلوبا روتينيا تقريبا . ولكن من الضرورى اتباع بعض القواعد البسيطة حتى لا يختلط علينا الأمر :

١ - اعزل الجسم . ما هى النقطة أو الجسم الذى سوف تتحدث عنه ؟ القوى المؤثرة على هذا الجسم هى فقط تلك القوى التى تلزم لكتابة المعادلات (١ - ٦) .

---

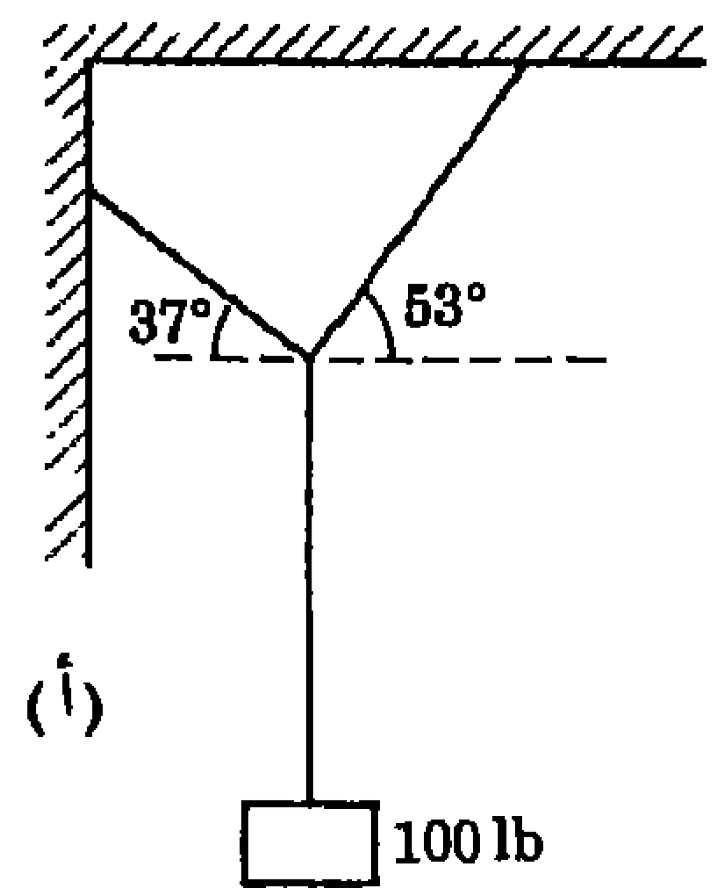
*هذا بفرض أن جميع القوى ليست لها مركبات فى اتجاه المحور z . أما اذا وجدت قوى مؤثرة فى الاتجاه z فيجب اضافة $\Sigma F_z = 0$ الى شروط التوازن المذكورة فى المعادلات (١ - ٦) .

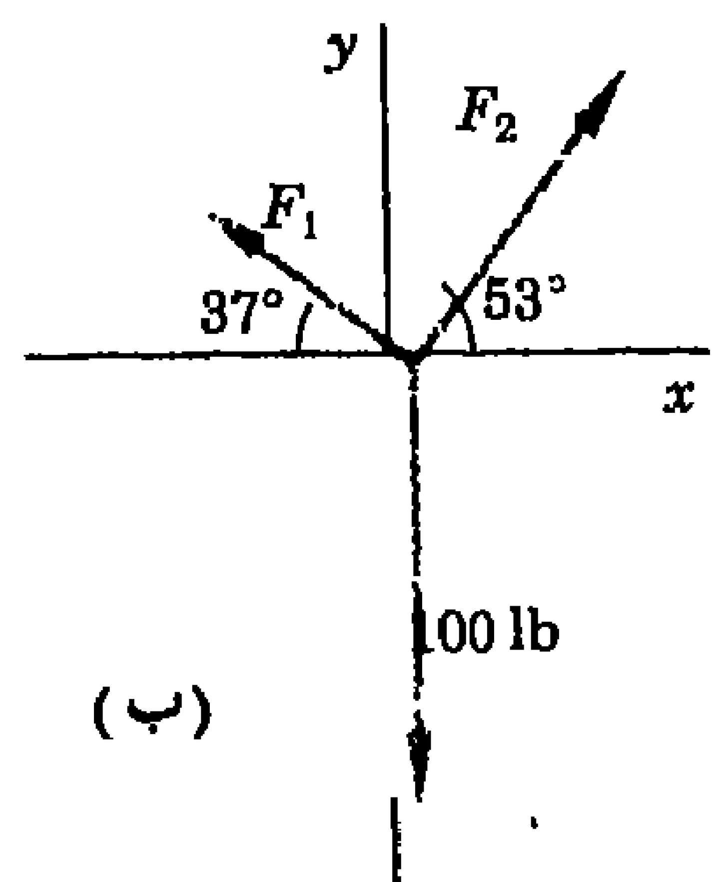
٢ – ارسم القوى المؤثرة على الجسم الذى عزلته ثم ميزها بعلامات مناسبة (واذا لم تكن مقادير هذه القوى معلومة يمكن الرمز اليها بحروف مثل F_1 ، P ، Q . الخ) ، سنسمى هذا الرسم **برسم بيان الجسم الحر** .

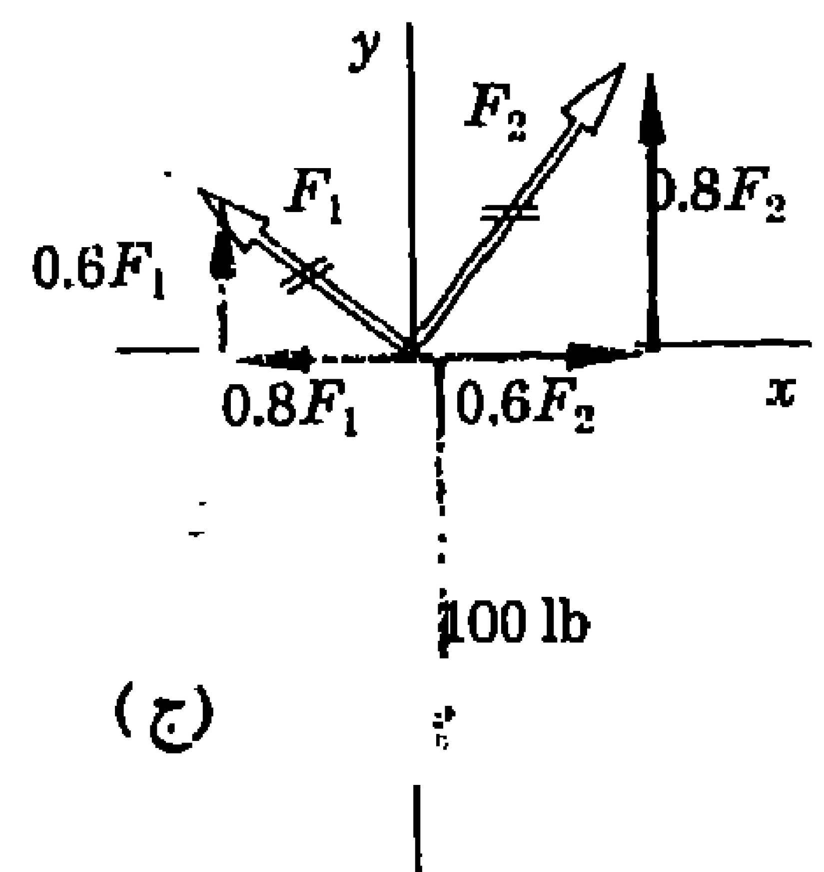
٣ – قسم كل من القوى الى مركباتها فى الاتجاهات x ، y ، z ثم ميز هذه المركبات بدلالة الرموز المعطاه فى القاعدة ٢ واستخدام جيوب أو جيوب تماما الزاويا المناسبة .

٤ – اكتب المعادلات (١ – ٦) .

٥ – حل المعادلات بالنسبة للمجاهيل .







شكل (١ – ١٩)
حيث أن نقطة اتصال الحبال فى (أ) موجودة فى حالة التوازن فان القوى y لابد أن تتلاشى فى (جـ) . وهذا صحيح أيضا بالنسبة الى القوى x .

مثال توضيحى ١ – ٩ : لتوضيح هذه الطريقة سنبين كيف يمكننا ايجاد الشد فى كل من الحبال الموضحة فى شكل ١ – ١٩ أ . (تذكر أن الشد فى حبل هو القوة التى يجذب بها الحبل الجسم المتصل به) .

طريقة الحل : نعلم من اللحظة الأولى أن الشد فى الحبل السفلى هو 100 lb لأنه يحفظ الجسم الثقيل فى مكانه . سنعتبر أن نقطة اتصال الحبال الثلاثة هى الجسم (أو النقطة) التى سوف نعزلها ، ومن المعقول اختيار هذه النقطة لأن احدى القوى المؤثرة عليها معلومة مقدما بينما القوتان الأخريان هما القوتان المطلوب ايجادهما بالفعل .

لقد نفذنا الخطوة ٢ من طريقة الحل فى الجز ب من شكل ١ – ١٩ ، بينما نفذت الخطوة ٣ من الجزء جـ من نفس الشكل . وقد كان من الممكن القيام بذلك مباشرة فى الجزء ب من الشكل ، ولكننا فضلنا فصل القوتين هنا لزيادة التوضيح . بالاضافة الى ذلك كتبنا $F_1 \sin 37°$ على الصورة $0.60\ F_1$ لأن $\sin 37°$ تساوى 0.60 ، كما استخدم نفس الاسلوب للتعبير عن المركبات الأخرى* .

نحن الآن مستعدون لتنفيذ الخطوة ٤ . وبمجرد النظر الى شكل ١ – ١٩ جـ سنجد أن :

$$\Sigma F_x = 0: \qquad 0.60F_2 - 0.80F_1 = 0 \qquad (١ - ٧)$$

$$\Sigma F_y = 0: \qquad 0.80F_2 + 0.60F_1 - 100 = 0 \qquad (١ - ٨)$$

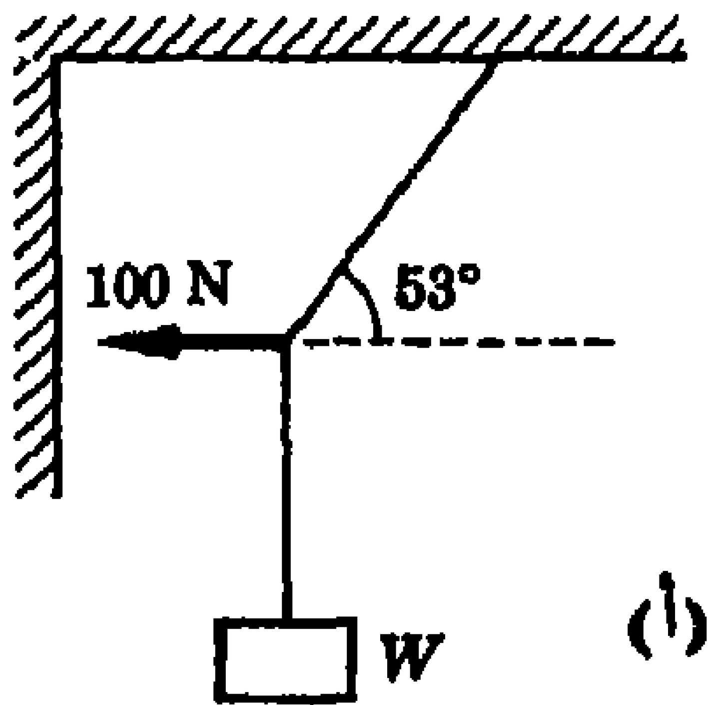
---

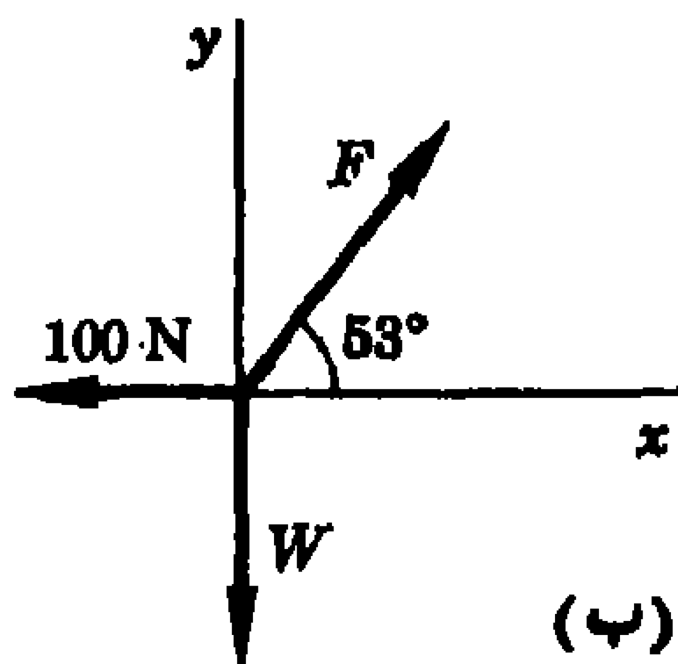
* من الملائم استخدام الزاويا 37° و 53° فى الأمثلة التوضيحية لأن $\sin 37° = \cos 53° = 0.60$ وكذلك $\cos 37° = \sin 53° = 0.80$ وبذلك لن نضطر الى الرجوع الى جداول النسب المثلثية . ويسمى المثلث القائم الزاوية ذى الحادتين 37° و 53° بالمثلث قائم الزاوية ٣ – ٤ – ٥ لان أطوال اضلاعه تتناسب مع هذه الاعداد .

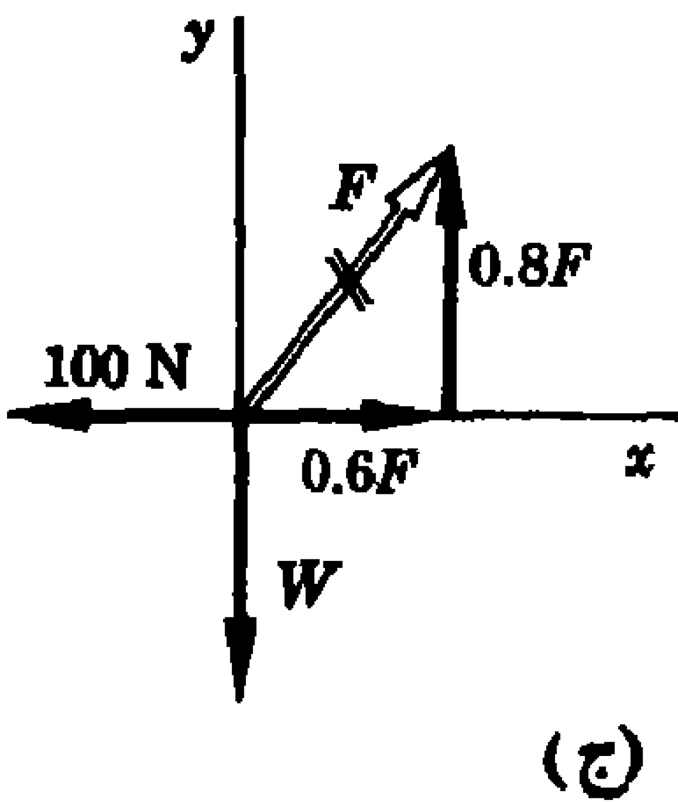
حيث حذفنا وحدات المقدار 100 وهى (lb) لتبسيط المعادلة .

لتنفيذ الخطوة ٥ يجب حل هاتين المعادلتين بالنسبة الى F_1و F_2 . تذكر من دراستك فى علم الجبر أن هناك طريقتين عامتين للحل .

الطريقة الاولى : اضرب المعادلة (١ – ٧) فى 0.6 والمعادلة (١ – ٨) فى 0.8 .







شكل (١ – ٢٠)
حيث أن الشد فى الحبل الأفقى معلوم ويساوى 100N فان المسألة تتلخص فى تعين قيمة W/يمثل الجزءان (ب) و (جـ) رسمى بيان القوى المناسبين .

$$0.36F_2 - 0.48F_1 = 0 \qquad (١ - ٩)$$

$$0.64F_2 + 0.48F_1 - 80 = 0$$

بجمع المعادلتين نحصل على :

$$1.00F_2 - 80 = 0 \quad \text{أو :} \quad F_2 = 80 \text{ lb}$$

بالتعويض فى المعادلة (١ – ٩) نحصل على :

$$0.48F_1 = (0.36)(80) \quad \text{أو :} \quad F_1 = 60 \text{ lb}$$

وبالتعويض عن هذه القيم فى المعادلة (١ – ٨) نجد أن :

$$0.80F_2 + (0.60)(0.75)(F_2) - 100 = 0 \quad \text{أو} \quad F_2 = 80 \text{ lb}$$

وباستخدام المعادلة (١ – ١٠) :

$$F_1 = 60 \text{ lb}$$

تتلخص الفيزياء المستخدمة فى ايجاد الشد فى الحبال أساسا فى رسم القوى وايجاد مركباتها وتطبيق قاعدة التوازن . ويلاحظ أن الجزء الأكبر من العمل يرتبط بعلم الجبر ويستخدم لحل المعادلات الآنية لإيجاد المجاهيل . ولكن لا تسمح للجبر أن يربكك فان مثل هذه المسائل مباشرة تماما ولايجب أن تمثل أية صعوبة . وسنتعلم فى الفصل التالى كيف نصف حركة الأجسام وسنرى فى الفصل الثالث كيف تسبب القوى المؤثرة على الأجسام حركتها .

مثال توضيحى ١ – ١٠ : اوجد وزن الجسم والشد فى الحبل العلوى بالنسبة للمثال الموضح فى شكل ١ – ٢٠ . لاحظ أن الشد فى الحبل الافقى معلوم ويساوى 100 N .

طريقة الحل : لايجاد الشد فى الحبل تختار نقطة اتصال الحبال الثلاثة لتمثل الجسم المعنى . لنعزل الآن هذا الجسم ونرسم رسم بيان الجسم الحر المناسب كما فى شكل ١ – ٢٠ ب . تحلل القوى كما فى الجزء جـ .

بكتابة شروط التوازن نحصل على :

$$\Sigma F_x = 0: \qquad 0.60F - 100 = 0$$
$$\Sigma F_y = 0: \qquad 0.80F - W = 0$$

بحل أولى هاتين المعادلتين نجد أن $F = 167$ N . وبالتعويض عن هذه القيمة فى المعادلة الثانية نحصل على $W = 133$ N .

ملخص :

الكميات الموجهة لها مقدار واتجاه معا . الكميات غير الموجهة ليس لها اتجاه . يمكننا تمثيل الكمية الموجهة بسهم يسمى متجه . يتناسب طول المتجه مع مقدار الكمية الموجهة فى اتجاه المتجه هو اتجاه الكمية الموجهة .

لجمع مجموعة من المتجهات بيانيا ترسم هذه المتجهات طرفا فى طرف . يوضع ذيل المتجه الثانى فوق رأس المتجه الأول ، ويوضع ذيل المتجه الثالث فوق رأس المتجه الثانى وهكذا دواليك . المتجه المحصل هو ذلك السهم الذى ينطبق ذيله على ذيل المتجه الأول وينطبق رأسه على رأس المتجه الأخير .

لجمع مجموعة من المتجهات باستخدام طريقة المركبات المثلثية يجب أولا إيجاد المركبات المتعامدة لكل متجه ، ويتم ذلك باستخدام الطريقة المثلثية الموضوعة فى الجزء ١ — ٤ . توجد المركبة x للمحصلة بايجاد المجموع الجبرى للمركبات x لجميع المتجهات . وبنفس الطريقة يمكن ايجاد المركبة y للمحصلة . ثم تطبق العلاقتان :

$$\tan\theta = \frac{R_y}{R_x} \qquad \text{:و} \qquad R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

حيث θ هى الزاوية التى تصنعهاالمحصلة مع المحور x .

لكى يكون الجسم فى حالة توازن لابد أن تكون القوة المحصلة المؤثرة عليه مساوية للصفر . ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا بالمعادلة :

$$\Sigma \mathbf{F} = 0$$

كذلك يمكن التعبير رياضيا عن هذا الشرط بدلالة مركبات القوى المؤثرة على الجسم على الصورة :

$$\Sigma F_x = 0 \qquad \Sigma F_y = 0 \qquad \Sigma F_z = 0$$

ويسمى هذا الشرط بالشرط الأول للتوازن . هناك أيضا شرط ضرورى ثان للتوازن وهو يتعلق بالقوى التى يمكن أن تسبب دوران الجسم .

لحل المسائل المتعلقة بالأجسام فى حالة التوازن يجب اتباع الخطوات الخمس للطريقة المذكورة فى الجزء ١ — ٩ بالترتيب .

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية* :

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل التالى :

١ — شرح الفرق بين الكميات الموجهة وغير الموجهة وإعطاء أمثلة لكل منها .

٢ — رسم رسم بيان المتجهات التى تمثل سلسلة من الإزاحات التى تقوم أنت بوصفها .

٣ — ايجاد محصلة مجموعة من المتجهات برسمها بيانيا باستخدام مقياس رسم مناسب .

٤ — شرح معنى الشد فى خيط أو حبل .

٥ — تعريف $\sin\theta$ و$\cos\theta$ و$\tan\theta$. ايجاد الجيب وجيب التمام والظل لزاوية معلومة باستخدام جداول النسب المثلثية .

٦ — استخدام حساب المثلثات لايجاد أطول الأضلاع والزوايا المجهولة فى مثلث قائم الزاوية .

---

* لاحظ كلمتى الحد الأدنى . يتحتم أن يحقق جميع الطلاب هذه الأهداف .

٧ – إيجاد المركبات المتعامدة لمتجه معلوم ، أو ايجاد المتجه وزاويته بمعلومية مركبتى هذا المتجه .

٨ – جمع مجموعة من المتجهات باستخدام طريقة المركبات المثلثية .

٩ – صياغة الشرط الأول للتوازن فى صورة كلمات ومعادلات ، تبين ماإذا كانت القوى المؤثرة على الجسم تحقق هذا الشرط .

١٠ – استخدام الشرط الأول للتوازن فى حل المسائل البسيطة مثل تلك المعطاه فى الجزء ١ – ٩ .

١١ – اعطاء أمثلة لمسافات تساوى تقريبا 1 mm ، 1 cm ، 1 km .

١٢ – التعبير عن وزنك بالتقريب بالنيوتين .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تستطيع تعريف أو شرح كل من الآتى :

الكمية غير الموجهة	الطريقة المثلثية لجمع المتجهات
الكمية الموجهة	متجه القوة
متجه الازاحة	النيوتن (وحدة)
نظرية فيثاغورث	الشد فى خيط
المتجه المحصلة	وزن جسم ما
الطريقة البيانية لجمع المتجهات	رسم بيان الجسم الحر
الجيب وجيب التمام والظل	عزل جسم ما
المركبات المتعامدة للمتجه	الشرط الأول للتوازن

أسئلة وتخمينات

تتطلب الأسئلة ذات العلامة (ق) أن تعطى تقديرا مبنيا على خبرتك الخاص .

١ – أى من الكميات التالية يمكن أن تمثل بمتجه : (أ) قوة الجاذبية الأرضية ، (ب) عدد السكان فى مدينة ، (جـ) سرعة الرياح ، (د) حركة القارب ، (هـ) عدد الكتب على رف ، (و) تدفق الماء فى ماسورة ؟

٢ – هل تستطيع قوة متجهة الى الشرق أن تتزن مع قوة متجهة الى الشمال ؟

٣ – هل يمكن الحصول على قوة متجهة شمالا تماما بتراكب قوة متجهة ناحية الشمال الشرقى وقوة مساوية لها متجهة الى الشمال الغربى؟ وماذا يحدث اذا كانت هاتان القوتان غير متساويتين ؟

٤ – بين فى أى اتجاه يجب أن تتجه ثلاث متجهات متساوية المقدار بحيث يكون مجموعها مساويا للصفر . هل يمكن تحقيق ذلك بأكثر من طريقة ؟ هل يمكن تحقيق ذلك اذا كانت المتجهات الثلاثة غير متساوية ؟ هل يتحقق ذلك بقوتين غير متساويتين فى المقدار ؟

٥ – تسبب اشارات المرور الضوئية المعلقة فى أسلاك ممتدة عبر الطريق ارتخاء هذه الاسلاك . لماذا لا يزيل العمال هذا الإرتخاء عندما يضبطون هذه الأسلاك ؟

٦ – تحمل انثى القطط طفلها الصغير بامساكه بفمها من الجلد خلف الرقبة ورفعه . صف تأثير القوى المشتركة فى العملية وبين أن هذه الطريقة أفضل من طرق أخرى مثل جذب القط الصغير من أطرافه مثلا .

٧ – مثل كل شخص فى مدينة عدد سكانها 200,000 نسمة بمتجه يمتد من طرف الأنف الى إخمص القدم قدر محصلة هذه المتجهات (أ) فى الساعة ١٢ ظهرا ، (ب) عند منتصف الليل . كرر العمل اذا كان المتجه يمتد من الأذن اليمنى الى الأذن اليسرى (ق) . (يجب تقدير متوسط المسافة من طرف الأنف الى إخمص القدم وكذلك عدد الأشخاص الواقفين) .

٨ – يقوم اللاعبون فى سيرك عادى باداء لعبة الهرم الآدمى . ويتم ذلك بأن يقف ثلاثة بهلوانات على الأرض جنبا الى جنب ، ثم يقف بهلوانان على أكتافهم وأخيرا يقف بهلوان واحدا على كتفى هذين الاثنين . قدر (أ) القوة المؤثرة على كتفى البهلوان السفلى الأوسط ، (ب) القوة التى يؤثر بها كل من قدميه على الأرض . هل تعتمد اجابتك على ما اذا كانت البهلوانات السفلى الثلاثة تقف متلاصقة أم لا ؟ (ق) .

٩ – يرفع لاعب فى جزء من دوره على الأرض بشد شعر رأسه ببطء الى أعلى ولكن لسوء الحظ اصيب هذا اللاعب بالصلع السريع . ما هو بالتقريب عدد الشعرات الذى يجب أن يبقى على رأسه حتى يؤدى دوره بامان (ق) (يجب تقدير قوة الشعرة الواحدة) .

مسائل :

تحل المسائل ذات الرمز (ب) بيانيا ، وتحل جميع المسائل الأخرى باستخدام علم حساب المثلثات .

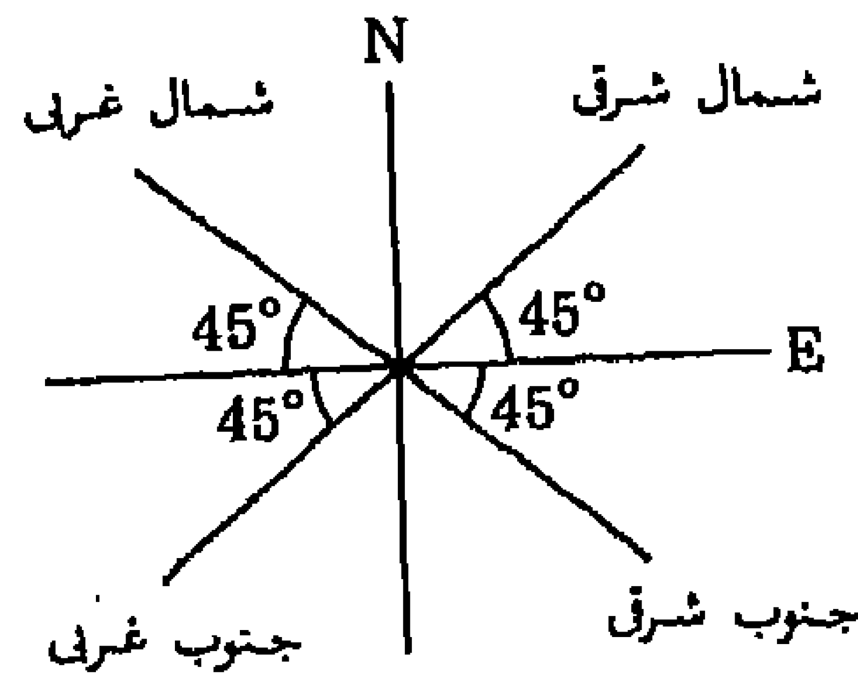
١ – (ب) يقع بيتى على بعد ستة صففوف من البيوت والمحلات التجارية المتلاصقة شرقا وثمانية صفوف من البيوت والمحلات التجارية المتلاصقة شمالا بالنسبة الى المبنى الذى أعمل فيه . ما هى المسافة الخطية المستقيمة بين هاتين النقطتين . ما هى المسافة الخطية المستقيمة بين هاتين النقطتين . ماهى الزاوية التى يصنعها هذا الخط المستقيم مع الاتجاه الشرق ؟

٢ – (ب) ما هى المسافة الخطية المستقيمة بين نقطتين اذا كانت احداهما تقع على بعد 20 km شرقا 16 km شمالا بالنسبة الى النقطة الأخرى ؟ ماهى الزاوية التى يصنعها هذا الخط مع الاتجاه الشرق ؟

٣ – (ب) اذا طارت طائرة مسافة 100 km فى الإتجاه الجنوبى الغربى فما هى المسافة التى قطعتها الطائرة غربا والمسافة التى قطعتها جنوبا (انظر شكل ١٣ – ١) ؟

٤ – (ب) تقع ديترويت على مسافة 110° mi تقريبا شمال غرب واشنطن . على أى مسافة تقع واشنطن جنوبى ديترويت (انظر شكل م ١ – ١)؟

٥ – (ب) أعطيت الإزاحات التالية الى جهاز تحديد الموضع فى خريطة نضدية : 5.0 cm بزاوية 0° ، 12.0 cm بزاوية 80° ، 7.0 cm بزاوية 110° ، 9.0 cm بزاوية 210° . وتقاس جميع الزوايا بالنسبة للمحور x عكس اتجاه دوران عقارب الساعة . (انظر شكل م ١ – ٢) للإزاحة 7.0 cm بزاوية 110°) . احسب مقدار وزاوية الإزاحة المحصلة .



٦ – (ب) تقع النقطة B على بعد 300 Km من النقطة A فى اتجاه 50° شمال الشرق ، ويمتد طريق مسافة 40 Km إلى الشرق من النقطة A ثم ينتهى . فاذا بدأت من نهاية الطريق فما هى المسافة وبأى زاوية من الإتجاه الشرق يجب ان تسافر حتى تصل الى النقطة B ؟

٧ – لكى يصل المرء من ميامى الى شيكاغو يجب أن يطير حوالى 1100mi بزاوية قدرها 30° غربا بالنسبة الى الشمال . على أى مسافة تقع شيكاغو شمال ميامى ؟ وعلى أى مسافة تقع غربها ؟

٨ – تؤثر قوة مقدراها 50 N فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 110° مع الإتجاه الموجب من المحور x فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة (انظر شكل م ١ – ٢) . ماهى المركبة x لهذه القوة ؟ وماهى المركبة y ؟

٩ – اوجد محصلة القوى الموضحة فى شكل م ١ – ٣ . اوجد الزاوية التى تصنعها المحصلة فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للمحور x .

١٠ – اوجد محصلة القوى الموضحة فى شكل م ١ – ٤ . اوجد الزاوية التى تصنعها المحصلة فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للمحور x .

١١ – كسرت ساق طالب فى حادثة ثم نقل الى المستشفى حيث وضعت ساقه فى الجبس وعلقت كما هو موضح فى شكل م ١ – ٥ . وبفرض ان البكرات لا احتكاكية فإن الشد فى الحبل سيكون متساويا فى جميع أجزائه ، وبالتحديد 7.0 lb . ما هى القوة التى تمد ساق الطالب ؟ وما هى القوة التى يؤثر بها الجهاز على قدمه وساقه معا ؟

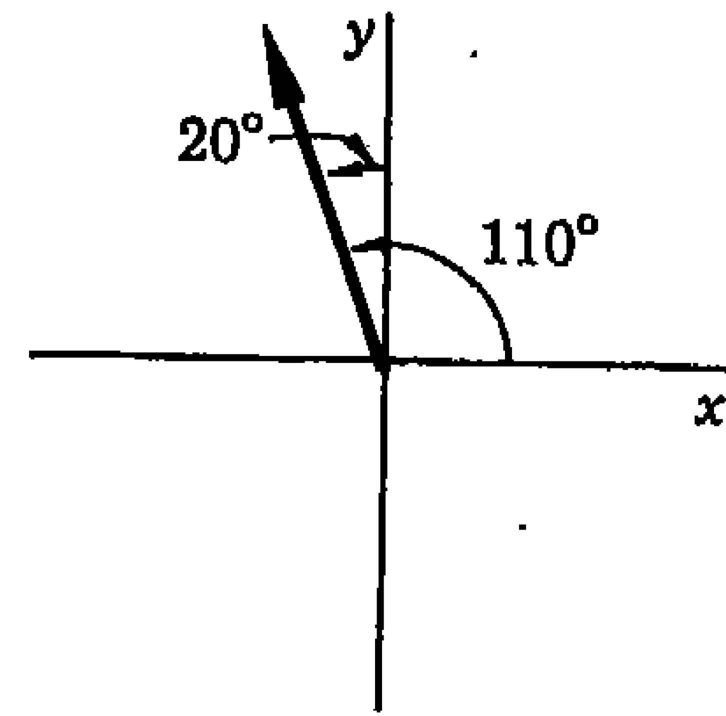
١٢ – اوجد محصلة القوى الثلاث الآتية : 10.0 N بزاوية 30° ، 20.0 N بزاوية 90° ، 30 N بزاوية 250° . تقاس جميع الزوايا عكس اتجاه دوران عقارب الساعة بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x . ماهو مقدار واتجاه القوة التى تتزن مع هذه القوى الثلاث ؟

١٣ – تؤثر قوة مقدارها 20.0 lb فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 270° مع الإتجاه الموجب للمحور x (تقاس الزوايا فى عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للإتجاه الموجب للمحور x) . وتتزن هذه القوة مع قوتين احداهما 150 lb بزاوية قدرها 90° والأخرى مجهولة . اوجد مقدار واتجاه القوة المجهولة .

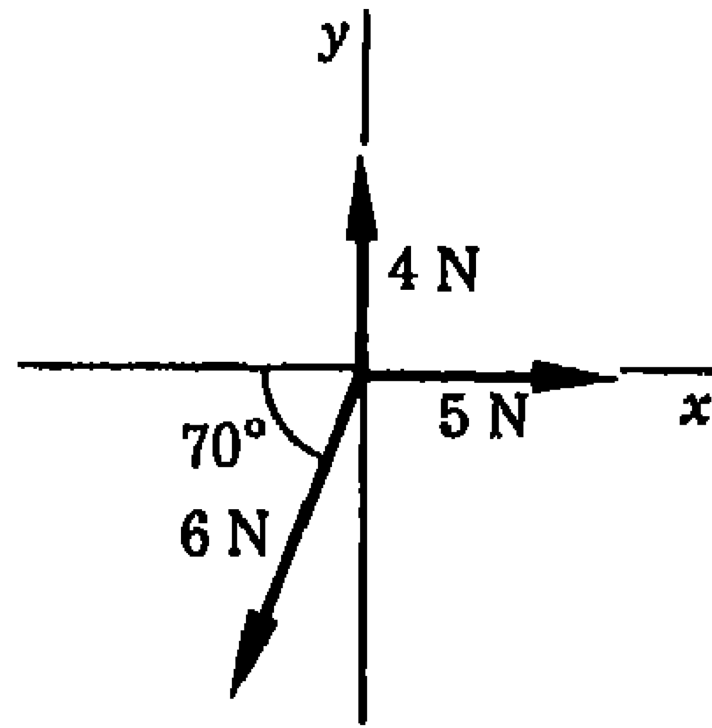
١٤ – تستقر حشرة على لوح خشبى طاف على سطح مجرى مائى ويتحرك فى خط مستقيم مع التيار فى الإتجاه الجنوبى بسرعة قدرها 5.0 Cm/s (centimeters per second) أى خمس سنتيمترات فى الثانية . فاذا تحركت الحشرة على اللوح فى عكس اتجاه التيار (أى شمالا) بسرعة قدرها 3.0 cm/s فما هى سرعة الحشرة بالنسبة لشاطىء المجرى المائى ؟

١٥* كرر المسألة ١٤ اذا كانت الحشرة تسير بنفس السرعة على اللوح ولكن فى اتجاه الشرق .

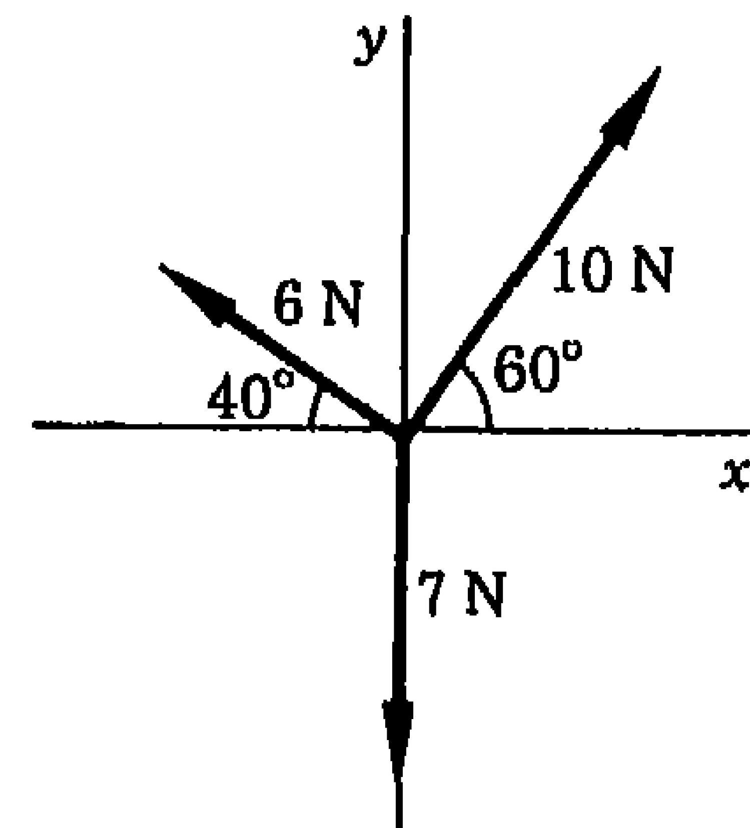
١٦ – يتسلق طالبان وزن كل منهما 200 N حبلا واحدا فى صالة التربية الرياضية . وعندما توقف الطالبان عن الحركة تماما كان بعد الطالب العلوى عن السقف 12 ft بينما كان بعد الآخر عن السقف 18 ft . ما هو الشد فى الجزء العلوى من الحبل ؟ وما هو الشد فى ذلك الجزء الموجود بين المتسلقين ؟ افترض أن الحبل ذو وزن مهمل .



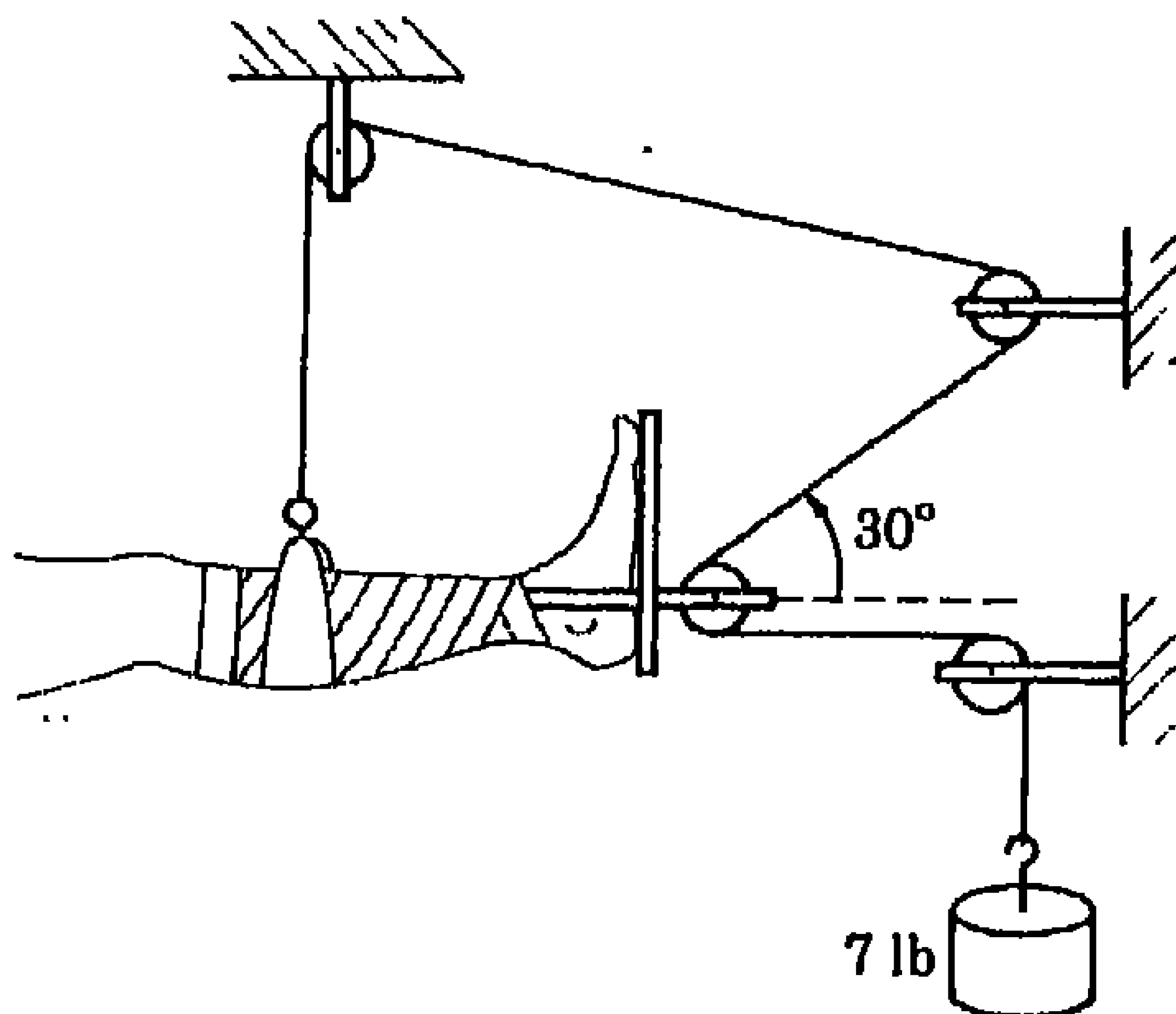
شكل (م ١ – ٢)



شكل (م ١ – ٣)



شكل (م ١ – ٤)



شكل (م ١ – ٥)

١٧ – قذف حبل مهمل الوزن على فرع شجرة بحيث تدلى طرفاه قرب الأرض . وتسلقت فتاتان وزن كل منهما 50 lb فرعى الحبل مسافة ما الى أعلى بحيث تعلقتا فيهما . ماهو الشد فى كل من فرعى الحبل ؟ وماهى القوة التى يجذب بها الحبل فرع الشجرة الى أسفل ؟

١٨ – يقف ستة من اللاعبين كما موضح فى شكل م ١ – ٦ ، وكان وزن كل من اللاعبين الثلاثة السفليين 900 N بينما كان وزن كل من اللاعبين العلويين الثلاثة 600 N . إوجد محصلة القوة (مقدارا واتجاها) التى يؤثرون بها على الأرضية .

١٩ – يزن لاعب المشى على الحبل الموضح فى الشكل م ١ – ٧ 150 lb إوجد الشد فى الحبل .

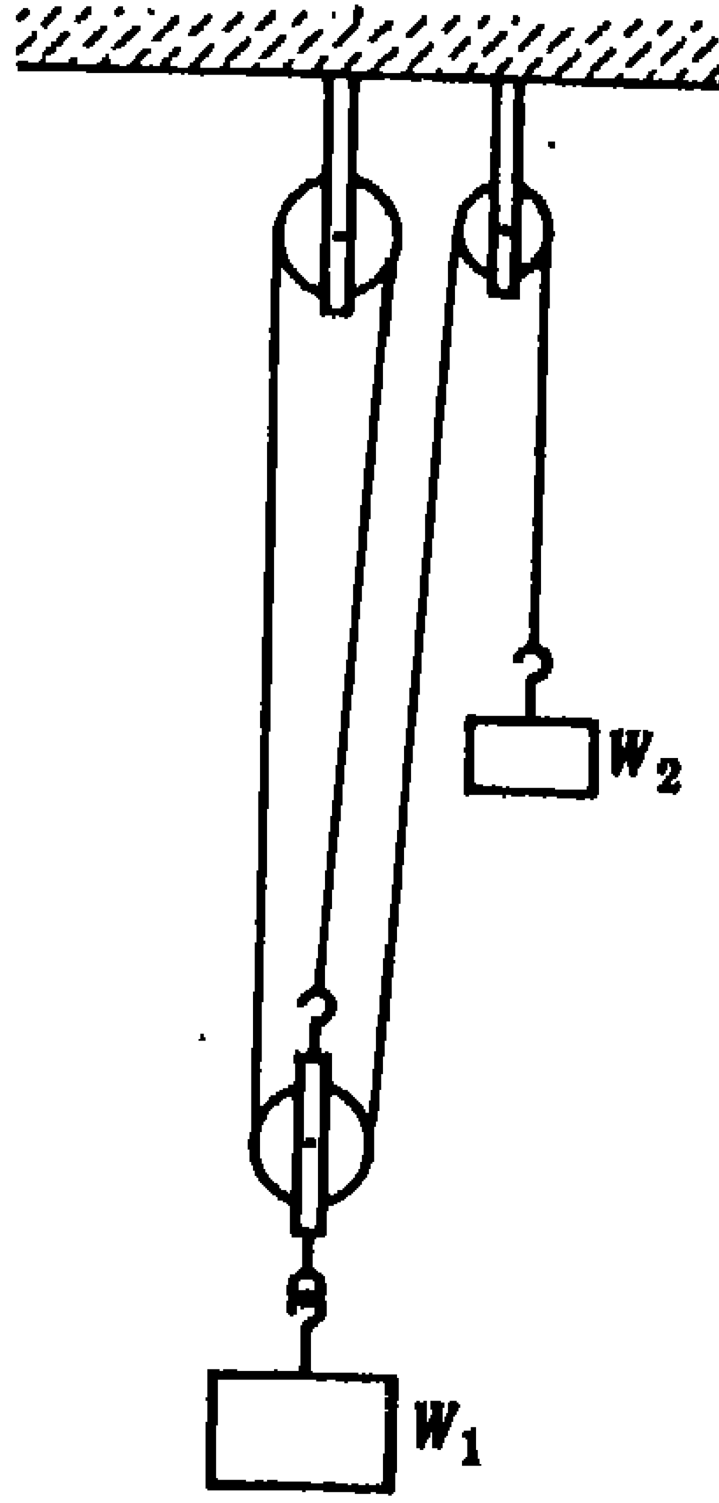
٢٠ – يتحمل الحبل المبين فى الشكل م ١ – ٧ شد مقداره 2000 N فقط . ما وزن اللاعب الذى يستطيع هذا الحبل حمله فى الوضع المبين ؟

٢١ – تعتبر البكرات فى وضع التوازن الموضح فى الشكل م ١ – ٨ لا احتكاكية وعليه فان الشد متساو فى جميع اجزاء الحبل . افترض أن وزن البكرات والحبال مهمل وأن الحبال رأسية أساسا . ما هو الشد فى الحبل بدلالة وزن الجسم المعلق الأيمن W_2 ؟ ماهى النسبة بين W_1 و W_2 ؟ هذا هو جهاز بسيط لرفع الأحمال الكبيرة .

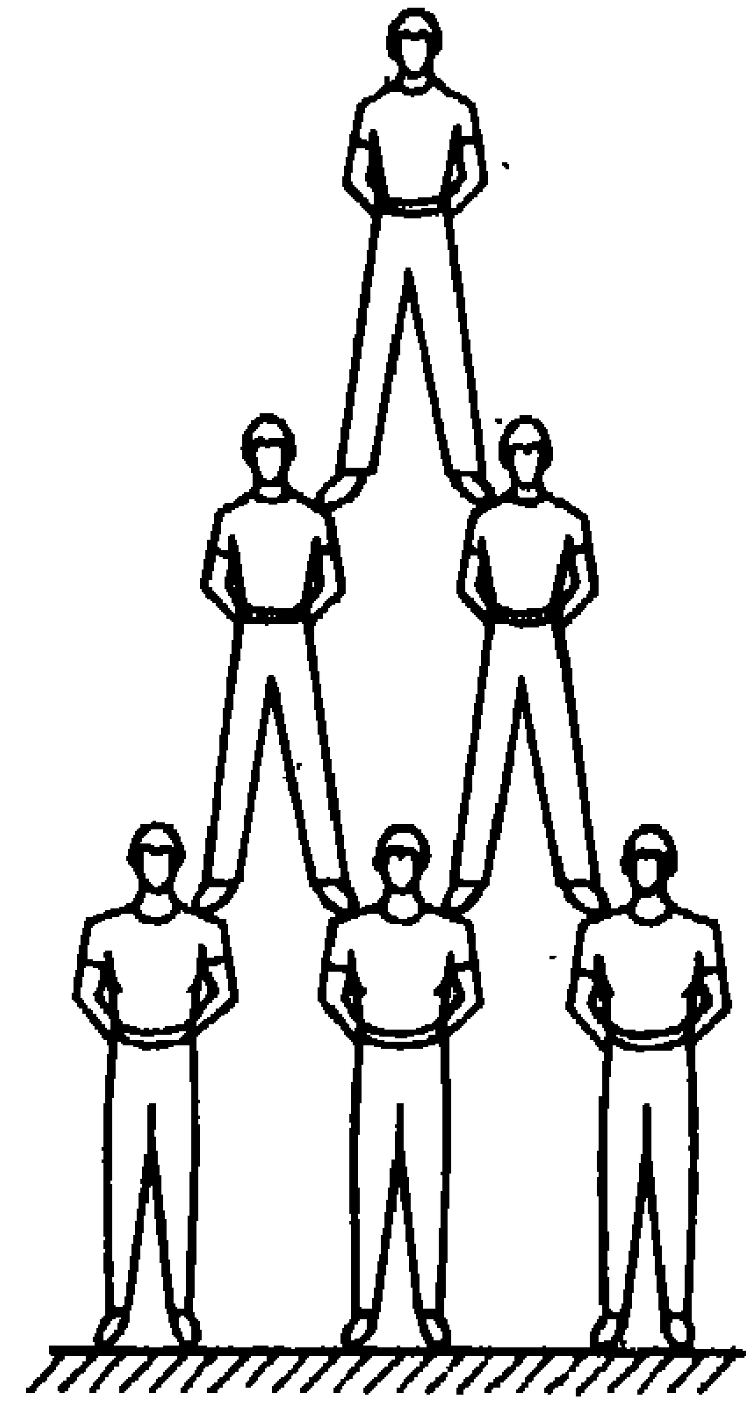
٢٢ – وزن الجسم الموضح فى شكل م ١ – ٩ هو $W = 200$ N ما هو الشد فى الحبل الأفقى ؟ يمكن اهمال وزن الحبال .

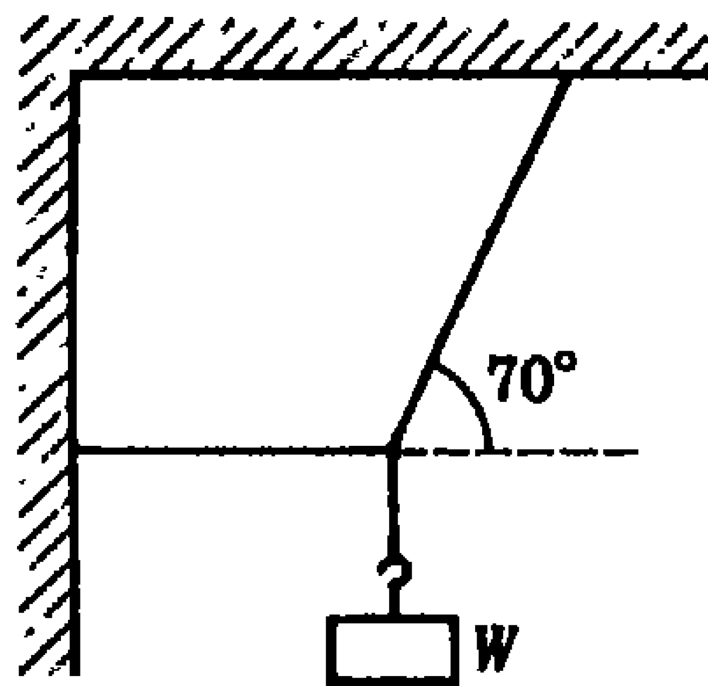
٢٣ – اذا علمت أن الشد فى الحبل الايسر فى شكل م ١ – ١٠ هو 60 N ، اوجد W وكذلك الشد فى الحبل الأيمن .

٢٤ – اوجد W_2 و W_3 لحالة التوازن الموضحة فى شكل م ١ – ١١ . افترض أن $W_1 = 100$ lb وأن البكرات لا احتكاكية .

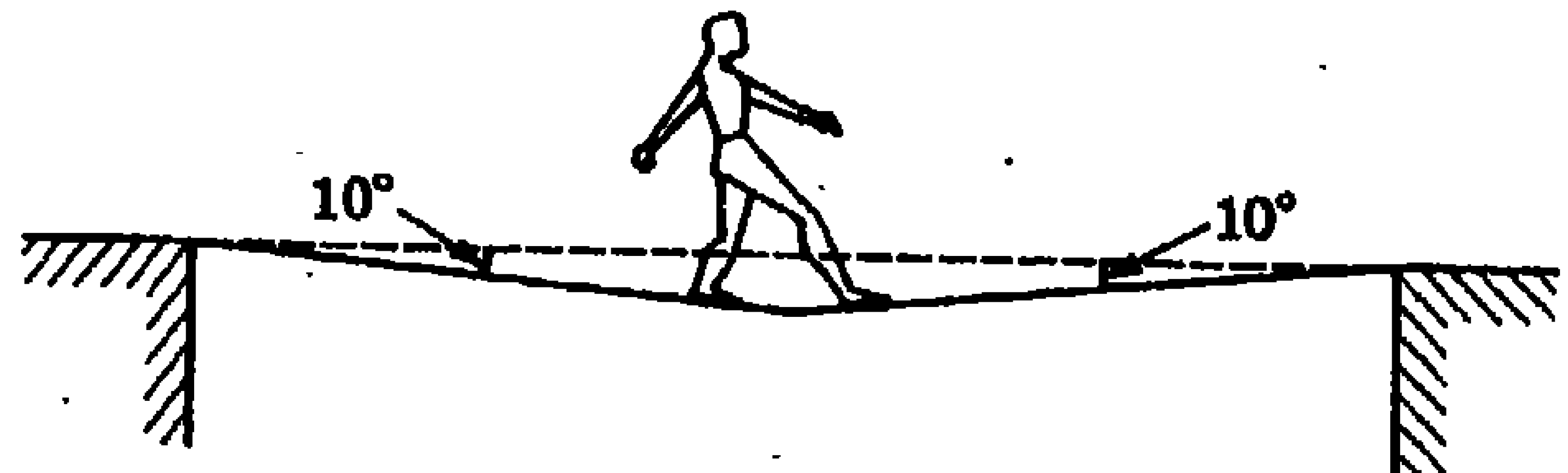


شكل (م ١ – ٨)


شكل (م ١ – ٦)

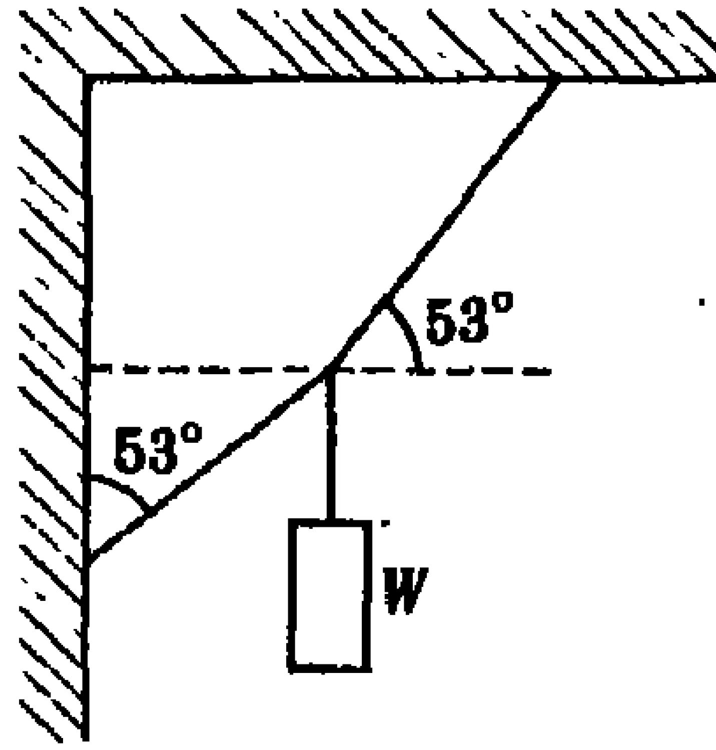


شكل (م ١ – ٩)

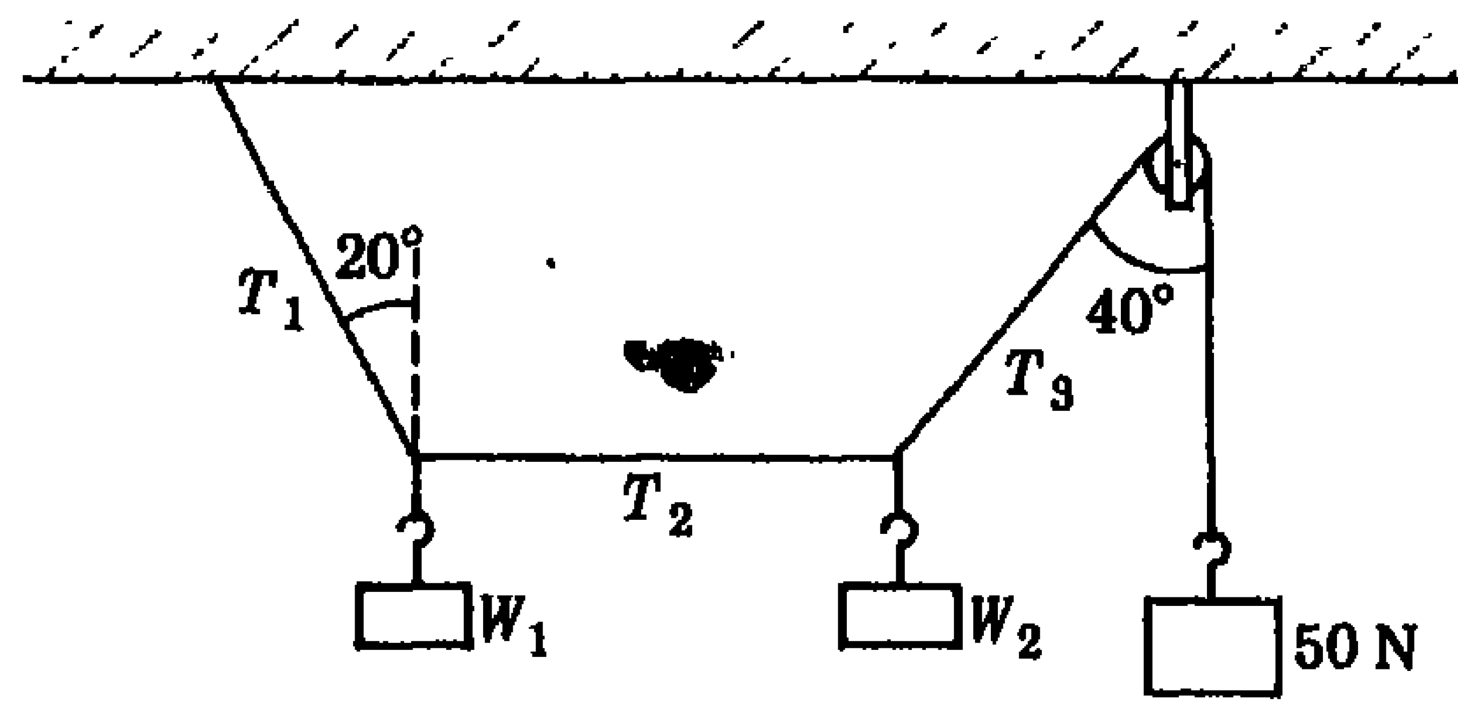


شكل (م ١ – ٧)

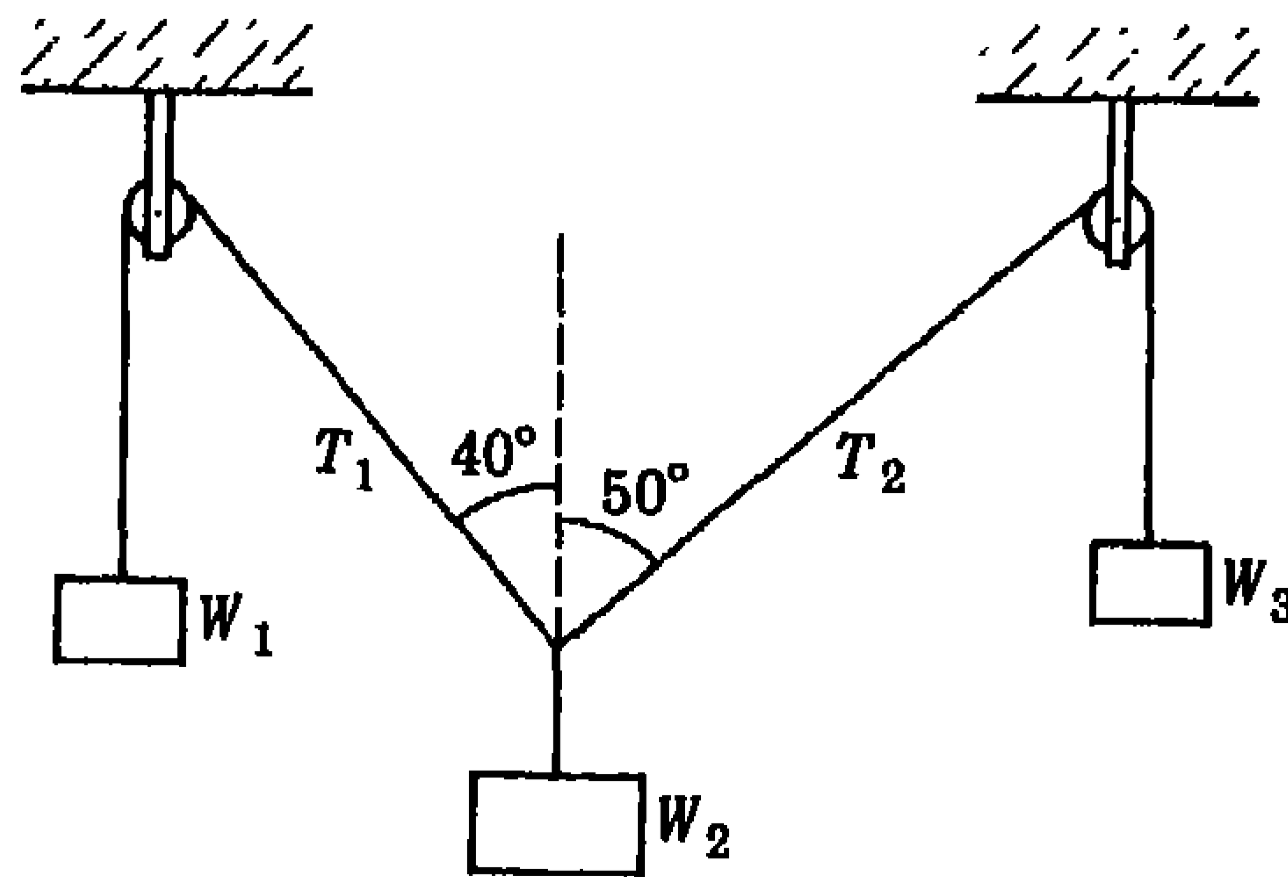
٢٥* – إوجد W_1، W_2، t_1، T_2 لحالة التوازن الموضحة فى شكل م ١ – ١٢ بفرض أن البكرات لا احتكاكية .



شكل (م ١ – ١٠)



شكل (م ١ – ١١)



شكل (م ١ – ١٢)

* هذه المسائل اكثر تعقيدا وتحتاج الى براعة أكثر من المتوسط .

الفصل الثانى

الحركة بعجلة منتظمة

تعلمنا فى الفصل السابق كيف نتعامل مع الأجسام الساكنة . ومن المناسب الآن دراسة الاجسام المتحركة . وتهتم هذه الدراسة بمناقشة طرق وصف حركة الاجسام بدلالة سرعتها وعجلتها أو تسارعها ، وسنجد أن هذه الطرق تمكننا من التنبؤ بحركة الأجسام أثناءالسقوط الذاتى . أما دور القوى فى إحداث الحركة فانه سوف يناقش فى الفصل التالى .

٢ - ١ السرعة ومعدل الحركة

كلنا يفهم ماذا تعنى هذه العبارة « تسير السيارة بمعدل حركة قدره 50 mi/h » . وهذا يعنى أن السيارة سوف تقطع مسافة 50 mi فى 1 h اذا استمرت فى السير بهذا المعدل . ومع ذلك فمن غير المحتمل أن يحتفظ السائق بنفس هذا معدل تماما لمدة ساعة كاملة ، فإذا قطع السائق بالفعل مسافة 50 mi فى 1 h فيمكن القول بأن متوسط معدل الحركة أثناء هذه الرحلة هو 50 mi/h . ولكن لا يمكننا التعرف من البيانات المعطاه ما إذا كان السائق قد كسر حد معدل الحركة 50 mi/h لكى يوفر بعض الوقت لتناول فنجان من القهوة أثناء الطريق . وقبل أن نتورط فى مزيد من التعقيد من الضرورى أن نعرف بدقة ماذا يعنى بمتوسط معدل الحركة .

تعريف **معدل الحركة** هو المسافة المقطوعة فى وحدة الزمن . ووحدات هذه الكمية هى ميل فى الساعة ، قدم فى الثانية ، متر فى الثانية ، وهكذا . فاذا كنا نسافر بمعدل حركة قدره 10 mi فى 2 s فإن متوسط معدل حركتنا هو 5 mi/s . وقد حصلنا على هذه النتيجة وربما لا شعوريا ، باستخدام المعادلة

$$\text{متوسط معدل الحركة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}} ،$$

أو ، باستخدام الرموز :

$$\bar{u} = \frac{d}{t} \qquad (٢ - ١)$$

حيث يشير القضيب فوق الحرف u الى أن هذه هى القيمة المتوسطة .

لنوضح الآن كيف يمكن الحصول على وحدات معدل الحركة . لنحسب معدل حركة امرأة تقطع مسافة 10 m فى 2 s :

$$\bar{u} = \frac{10\ \text{m}}{2\ \text{s}} = 5\ \text{m/s}$$

وتقرأ هذه الكمية هكذا « خمسة أمتار فى الثانية » . بالمثل ، إذا قطع قوقع مسافة 2 cm فى 0.4 day فإن معدل حركته هو :

$$\bar{u} = \frac{2\ \text{cm}}{0.4\ \text{day}} = 5\ \text{cm/day}$$

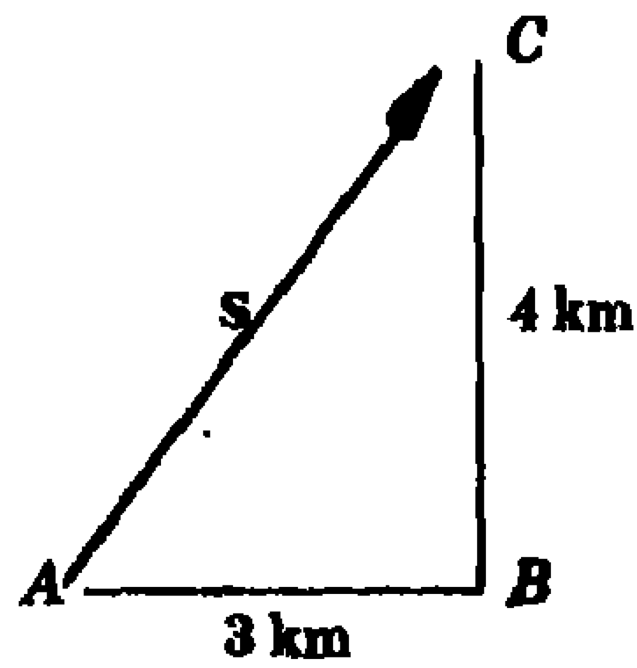
أى إن وحدات معدل الحركة هى دائما وحدة طول مقسومة على وحدة زمن . عندما تتحرك سيارة فى طريق مستقيم فإن حركتها تكون فى اتجاه محدد . واذا أردنا ربط هذين المفهومين – معدل الحركة والاتجاه – فإننا نتكلم عن متجه . من المعتاد تعريف متوسط **متجه السرعة** $\bar{\mathbf{v}}$ كما يلى : تعريف

$$\bar{v} = \frac{\text{displacement vector}}{\text{time taken}}$$

لنفرض مثلا أن سيارة تبدأ من النقطة A لتصل بعد زمن قدره t الى النقطة B فاذا كانت الازاحة الموجهة من A الى B هى $\mathbf{s}$ فإن تعريف متوسط السرعة يكون على هذه الصورة :

$$\bar{v} = \frac{\mathbf{s}}{t} \qquad (٢ - ٢)$$

وإذا كانت الحركة فى خط مستقيم فى اتجاه ثابت فان طول المتجه $\mathbf{s}$ سيكون ببساطة هو المسافة المقطوعة d . كنتيجة لذلك يمكننا القول أن مقدار السرعة فى هذه الحالة المعينة يساوى معدل الحركة لأن $\bar{u} = d/t = s/t = \bar{v}$. أما اذا لم تكن الحركة فى خط مستقيم فإن المسافة الكلية المقطوعة d قد تختلف فى المقدار عن الازاحة $\mathbf{s}$.



$d = 3 + 4\ \text{km} = 7\ \text{km}$

$s = \sqrt{3^2 + 4^2}\ \text{km} = 5\ \text{km}$

(a)

C 2 km

A 6 km B

$d = 8\ \text{km}$

$s = 4\ \text{km}$

(ب)

شكل (٢ - ١)

حيث أن مقدار متوسط معدل الحركة هو $\bar{u} = d/t$ ومقدار متوسط السرعة هو $\bar{v} = s/t$ فان هاتين الكميتين ليستا دائما متساويتين .

مثال توضيحى ٢ - ١ : يمثل الشكل ٢ - ١ أ مثالا بسيطا ويوضح مسار سيارة من النقطة A الى B ثم الى C.

طريقة الحل : نرى من الشكل أن المسافة الكلية المقطوع d هى 7 km . ومع ذلك فإن مقدار الإزاحة $\mathbf{s}$ هو 5 Km فقط . يمكننا اذن أن نجد أن :

$$\bar{u} = \frac{d}{t} = \frac{7\ \text{km}}{t} \qquad \text{بينما :} \qquad \bar{v} = \frac{s}{t} = \frac{5\ \text{km}}{t}$$

من الواضح أن مقدارى معدل الحركة والسرعة مختلفان فى هذه الحالة . ومع ذلك فإن مقدارى هاتين الكميتين قد يختلفان حتى فى حالة الحركة فى خط مستقيم ، وهذا موضح فى شكل ٢ - ١ ب حيث تسير السيارة من A الى B ثم خلفا الى C. فى هذه الحالة :

$$\bar{u} = \frac{8\ \text{km}}{t} \qquad \text{بينما :} \qquad \bar{v} = \frac{4\ \text{km}}{t}$$

ومع ذلك فاننا سوف نوجه جل اهتمامنا فى هذا الفصل الى الحركة ذات الاتجاه الواحد ، وفى هذه الحالة تكون $\bar{u}$ و $\bar{v}$ متساوين .

٢ - ٢ السرعة اللحظية ومعدل الحركة اللحظى

لندرس الآن جسما يتحرك فى خط مستقيم وليكن السيارة المذكورة فى الجزء العلوى من شكل ٢ - ٢ على سبيل المثال . وسنعتبر أن الاحداثى x هو ذلك الخط الذى تتحرك فيه السيارة كما هو موضح . بناء على ذلك فإن حركة السيارة تكون اما فى الإتجاه الموجب أو الإتجاه السالب من المحور x . (تكون الحركة سالبة اذا كانت

السيارة تتحرك فى عكس الاتجاه الموضح) . لنفرض أن السيارة تتحرك بمعدل حركة ثابت (وسرعة ثابتة) فى الاتجاه الموضح ، ولنفرض أن مقدار معدل الحركة (والسرعة) هو 20 m/s .

من الممكن إثبات أن إزاحة السيارة دالة للزمن على الرسم ، ومن المناسب قياس الازاحة من النقطة $x=0$. وعليه فإن مقدار متجه الازاحة s يساوى x . علاوة على ذلك فاذا كانت السيارة فى الموضع $x = -10m$ مثلا فان الإشارة السالبة تبين لنا اتجاه الازاحة ، وهذا يعنى فى هذه أن الإزاحة هى 10 m فى الإتجاه السالب من المحور x . وعليه فإننا سوف نمثل الإزاحة فى خط مستقيم بالمقدار x وهى إزاحة الجسم من النقطة $x=0$.

يمثل الشكل ٢ ـ ٢ ب رسما بيانيا يبين تغير x مع الزمن للسيارة المعنية ، ويلاحظ من الشكل أن الزمن t هو المتغير المستقل ويقاس على المحور الافقى للرسم البيانى وبمرور الزمن يتغير موضع السيارة ، وباستخدام الخط المستقيم الموضح فى الرسم البيانى يمكننا معرفة موضع السيارة عند أية لحظة محددة . فمثلا عند $t = 0$ كانت السيارة فى نقطة الأصل ، $t = 3$ s نجد أن $x = 60$ m ، أى أن السيارة كانت على مسافة قدرها 60 m من نقطة الأصل . لاحظ أن المثلثات الصغيرة الموضحة فى الرسم البيانى تبين لنا أن السيارة تسير مسافة قدرها $\Delta x = 20$ m فى زمن قدره $\Delta t = 1$ s . (من المعتاد استخدام Δx وتقرا « دلتا x » و Δt وتقرأ « دلتا t » تمثل فترات المسافة والزمن الصغيرة جدا) . من تعريف متوسط معدل الحركة نجد أن :

$$\bar{u} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20\text{ m}}{1\text{ s}} = 20\text{ m/s}$$

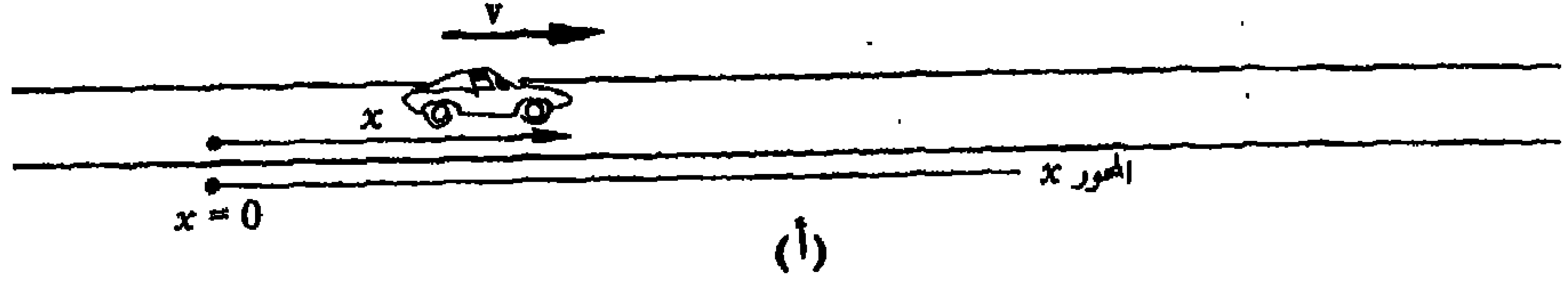
وهو ماكان متوقعا .

يعطى مقدار متوسط السرعة بالعلاقة التالية :

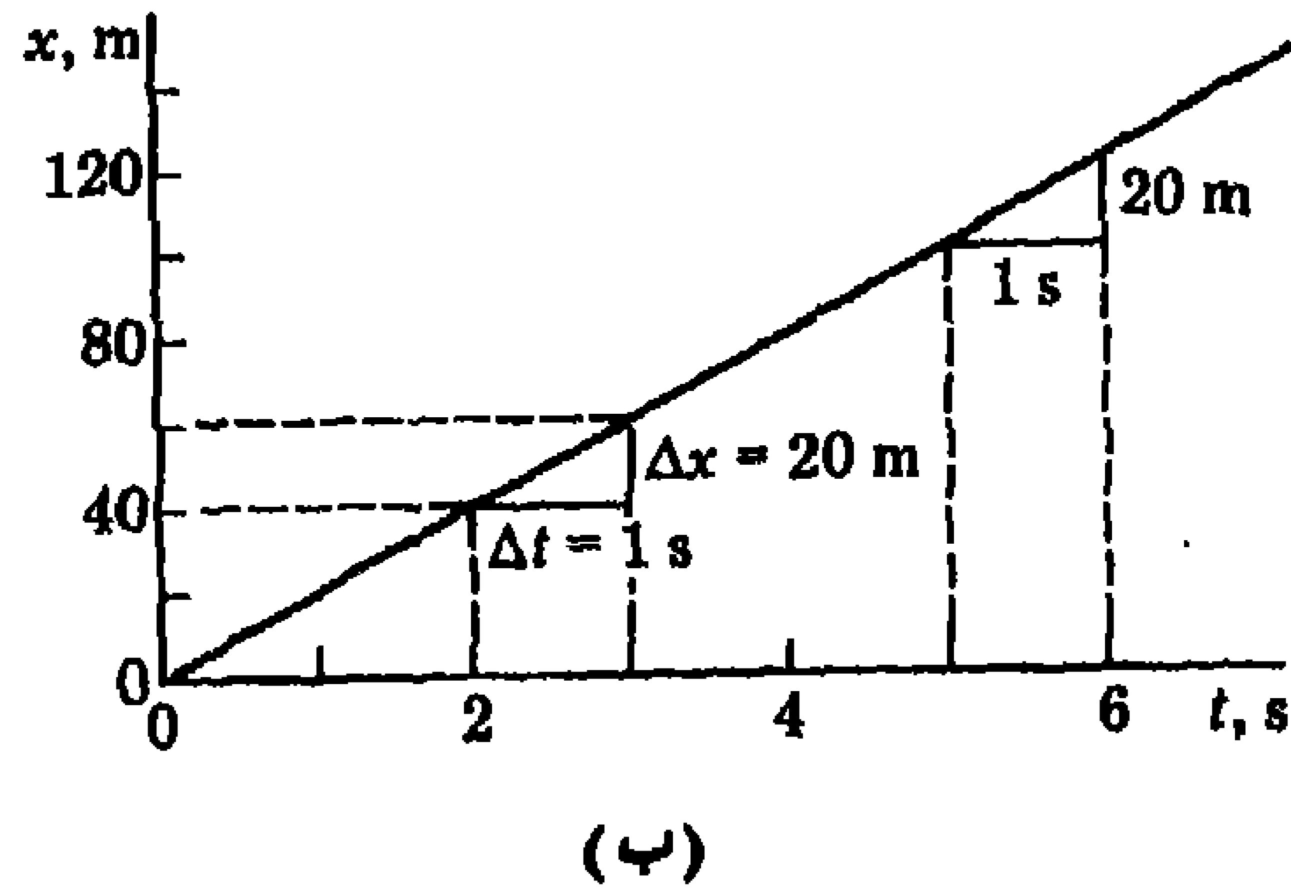
$$\bar{v} = \frac{\text{مقدار متجه الإزاحة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20\text{ m}}{1\text{ s}} = 20\text{ m/s}$$

من هذا يتبين أن مقدار متوسط السرعة يساوى متوسط معدل الحركة فى هذه الحالة . كذلك فإن الرسم البيانى يخبرنا بأن السيارة تتحرك بمعدل حركة ثابت ، اذ أن جميع المثلثات ذات الضلعين Δx و Δt والمشابهة لتلك الموضحة بالشكل تعطينا نفس متوسط معدل الحركة وهو 20 m/s يمكننا اذن استنتاج انه اذ كان الجسم يتحرك فى خط مستقيم بسرعة ومعدل حركة ثابتين فان الرسم البيانى الذى يمثل تغير x مع t لهذا الجسم يكون دائما خطا مستقيما .

وقبل أن نترك المثال الموضح فى شكل ٢ - ٢ يجب أن نلاحظ أن $\Delta x/\Delta t$ هو ميل الخط المبين* . وفى هذه الحالة على الأقل يتساوى مقدارا معدل الحركة والسرعة مع ميل الخط البيانى الذى يمثل العلاقة بين x و t ، وسنرى حالا أن هذا صحيح دائما .



(أ)



(ب)

شكل (٢ - ٢)
يمكن تمثيل الحركة فى خط مستقيم بيانيا . فى هذه الحالة كانت السيارة تتحرك بمعدل حركة ثابت مقداره 20 m/s .

مثال توضيحى ٢ - ٢ : تتحرك سيارة فى طريق مستقيم بمعدل حركة غير ثابت صف حركة السيارة بالاستعانة بالشكل ٢ - ٣ .

طريقة الحل : نرى من الرسم البيانى أن السيارة تقف ساكنة عند النقطة A و C حيث لا تتغير x بتغير t بالقرب من هاتين النقطتين ، وهذا يعنى بالضرورة أن السيارة لاتتحرك . وبالرغم من ذلك فان السيارة تتحرك بالقرب من النقطة B نحو القيم الأكبر من x لأن x تزداد مع الزمن . ويلاحظ أن الموقف بالقرب من B يشبه كثيرا ذلك الموضح فى شكل ٢ - ٢ . وفى الحقيقة فان متوسط معدل الحركة بالقرب من B هو :

$$\bar{u} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{50\ \text{m}}{20\ \text{s}} = 2.5\ \text{m/s}$$

ومتوسط سرعة السيارة بالقرب من B هو 2.5 m/s فى الاتجاه الموجب من المحور x . (لاحظ أن السرعة متجه) .

أما عند النقطة D فان الموقف يختلف قليلا ، فبالقرب من هذه النقطة تتحرك السيارة نحو القيم الأصغر من x لأن x تقل مع الزمن ، أى أن السيارة تسير فى الاتجاه المعاكس لذلك الموضح فى شكل ٢ -٢أ وحيث أن x تقل فى المنطقة القريبة من D

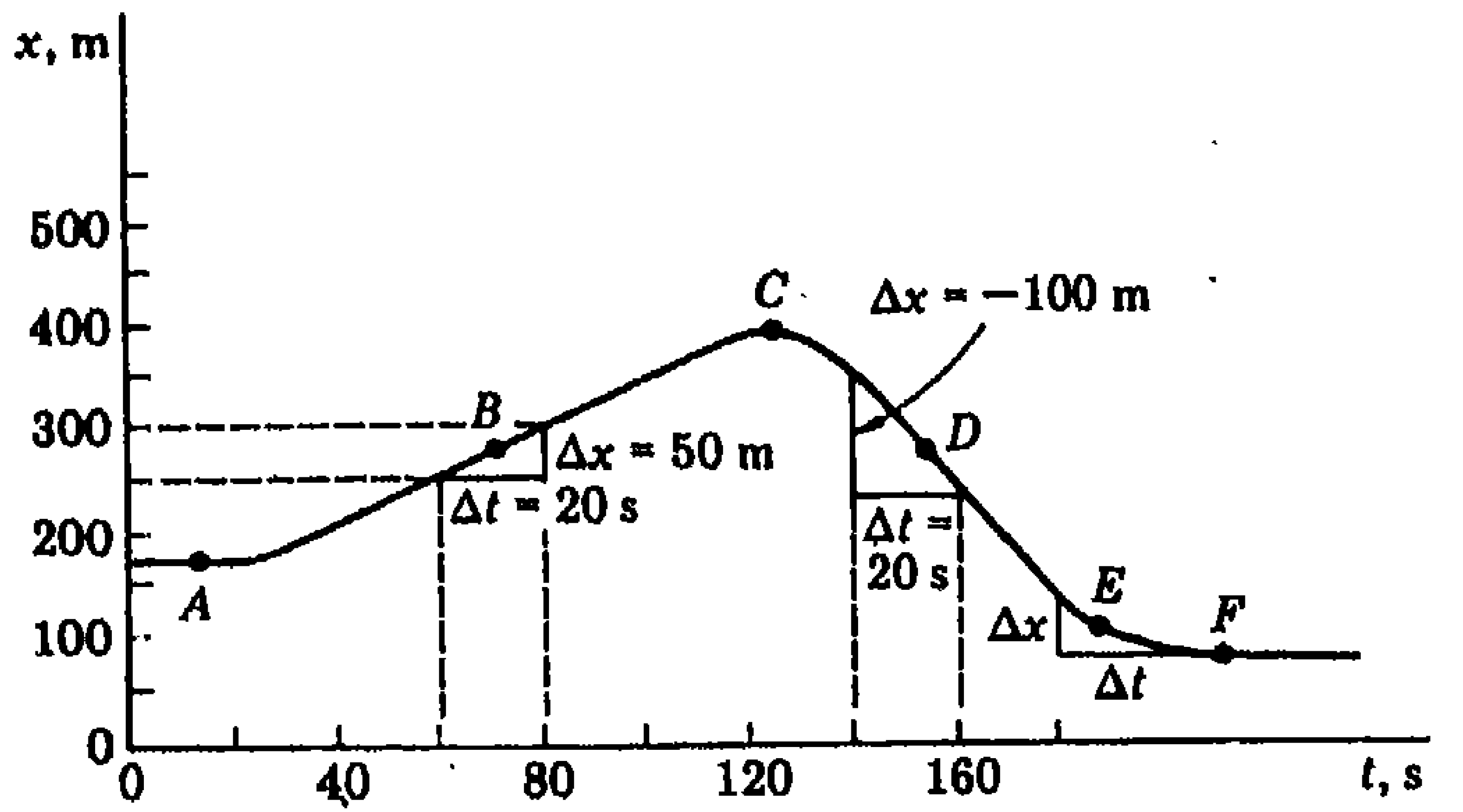
* لايجاد ميل المنحنى عند نقطة معينة عليه ارسم خطا مماسيا للمنحنى عند هذه النقطة . الميل هو ظل الزاوية التى يصنعها هذا الخط . أو ، بالتعبير العامى ، ارتفاع الخط المماسى مقسوما على مداه .

فان الكمية Δx سالبة لأنها تمثل نقصا فى x . متوسط معدل الحركة بالقرب من D هو :

$$\bar{u} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{|\Delta x|}{\Delta t} = \frac{100 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 5.0 \text{ m/s}$$

لاحظ أن معدل الحركة لا يرتبط بالاتجاه . بناء على ذلك فاننا نستخدم فقط مقدار المسافة Δx التى نمثلها هكذا $|\Delta x|$. وعند حساب معدل الحركة تسقط الاشارة السالبة التى تبين الاتجاه .

ولكن عند حساب متوسط السرعة بالقرب من D يجب استخدام الاشارة السالبة ، ويمكن تفسير الاشارة السالبة فى هذه الحالة على أنها الرمز الذى يعطى الاتجاه .



شكل (٢ – ٣)
هل يمكنك أن توضح من الرسم أن الجسم ساكن عند النقطتين A وC ؟ وهل يمكنك أن تبين أنه يتحرك فى اتجاهين متعاكسين عند النقطتين B وD ؟

اذن :

$$D \text{ متوسط السرعة عند} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-100 \text{ m}}{20 \text{ s}} = -5.0 \text{ m/s}$$

وتوضح الاشارة السالبة أن السرعة فى الاتجاه السالب من x .

أما الموقف عند النقطة E فانه يختلف عما سبق معالجته اذ أن السيارة تبطىء من حركتها فى هذا المكان استعداد للوقوف عند F . فاذا حسبنا الآن متوسط معدل حركة السيارة بالقرب من E من المثلث الموضح فان النتيجة قد تختلف عن القيمة المضبوطة لمعدل حركة السيارة عند E ، اذ أن القيمة المحسوبة هى فقط القيمة المتوسطة لمعدلات الحركة فى خلال الفترة التى يمثلها المثلث . ومع ذلك فاذا أخذنا فترة زمنية صغيرة جدا Δt بحيث تكون E مركزها فان النتيجة ستكون قريبة جدا من معدل حركة السيارة عند E .

وفى الحقيقة فان معدل حركة السيارة عند عبورها للنقطة E فى شكل ٢ – ٣ هو معدل حركتها للحظة واحدة فقط . ذلك لأن السيارة كانت تتحرك أسرع قبل ان تصل الى E منها عند E ، أما بعد ذلك فانها كانت تتحرك أبطأ منها عند E . يمكننا اذن أن نعرف معدل حركة الجسم عند لحظة معينة بأنه **معدل الحركة اللحظى** لهذا الجسم . لايجاد معدل الحركة اللحظى للسيارة عند النقطة E يجب قياس الزمن Δt اللازم لكى تقطع السيارة مسافة صغيرة جدا Δx مركزها هو النقطة E . ويمكن صياغة هذه العبارة رياضيا على الصورة الآتية : **تعريف**

$$\text{معدل الحركة اللحظى} = u \equiv \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

حيث تعنى الدلالة $\lim_{\Delta t \to 0}$ أننا نوجد قيمة $\Delta x/\Delta t$ عندما تكون قيمة Δt صغيرة صغرا كافيا ومقاربة للصفر . ومن الواضح أنه من غير المحتمل أن تغير السيارة معدل حركتها أثناء هذه الفترة الزمنية الضئيلة . وعليه فان معدل الحركة التى نقيسه سيكون قريبا جدا من معدل الحركة عند E ، وهذا هو معدل الحركة اللحظى عند النقطة E .

وحيث أن الجسم لايستطيع تغيير اتجاهه فى خلال هذه الفترة الزمنية القصيرة جدا فان ازاحة الجسم s المقاسة خلال هذه الفترة الزمنية ستكون مقاربة جدا للمسافة التى يتحركها الجسم خلال هذه الفترة . بناء على ذلك فان مقدار السرعة المقاس لهذه الفترة الزمنية الضئيلة سيكون قريبا جدا من معدل الحركة اللحظى وعليه فمن الممكن تعريف السرعة اللحظية للجسم كمايلى . لنفرض أن الجسم يجتاز ازاحة موجهة $\Delta \mathbf{s}$ فى فترة زمنية قصيرة جدا Δt . وعليه فان **السرعة اللحظية** للجسم تعرف كمايلى : **تعريف**

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \mathbf{s}}{\Delta t} \qquad (٢ - ٣)$$

حيث تعنى الدلالة $\lim_{\Delta t \to 0}$ أننا نأخذ القيمة الحدية للكمية $\Delta \mathbf{s}/\Delta t$ عندما تقترب قيمة Δt من الصفر . وكما أثبتنا فيما سبق ، مقدار السرعة اللحظية $\mathbf{v}$ يساوى معدل الحركة اللحظى u .

فى مثالنا المحدد ، $\Delta s = \Delta x$ وعليه $v = \lim_{\Delta t \to 0} \Delta x / \Delta t$ وكما نرى فان السرعة اللحظية تعطى بالنسبة بين Δx و Δt فى مثلث صغير مثل ذلك المثلث الموضح فى شكل ٢ – ٣ . ولكن اذا كان المثلث صغير صغرا كافيا فان قيمة $\Delta x/\Delta t$ ستكون ميل المنحنى البيانى حتى قرب نقطة مثل E . نستنتج من ذلك أن السرعة اللحظية فى اتجاه المحور x تساوى ميل المنحنى الذى يمثل تغير x مع t فى اللحظة المعينة . وبالاضافة الى ذلك فان اشارة الميل (+ أو –) تبين ما اذا كانت السرعة فى الاتجاه الموجب أو السالب من المحور x .

٢ – ٣ تحويل الوحدات

فى كثير من الأحيان تعطى لنا الكميات مقاسة بوحدات معينة ويكون من الضرورى تحويلها الى وحدات أخرى . فمثلا قد نعلم معدل الحركة بالميل فى الساعة ويراد ايجاد القيمة المكافئة بالمتر فى الثانية . أو ، كمثال آخر ، تعبر صكوك ملكية العقارات القديمة عن أبعاد الملكية بالقصبة ، بناء على ذلك يلزمنا أن نعرف كيف يحول الطول بالقصبات الى أقدام أو أمتار . لاجراء مثل هذا النوع من تحويل الوحدات يجب استعمال معاملات التحويل . من المعلوم ، مثلا ، أن :

$$1 \text{ rod} = 16.50 \text{ ft}$$

لاستخدام هذه الحقيقة اقسم طرفى المعادلة على 1 rod لتحصل على :

$$1 = \frac{16.50 \text{ ft}}{1 \text{ rod}}$$

تسمى هذه الكمية **معامل التحويل** بين القصبات والأقدام .

لاحظ أن معامل التحويل يساوى الوحدة ، لذلك اذا ضرب أى عدد فى هذه الكمية أو قسم عليها فانه لن يتغير وسنرى فائدة هذه العملية فى المثال التوضيحى التالى .

مثال توضيحى ٢ – ٣ : حول 30 rod الى الطول المكافىء بالأقدام .

طريقة الحل : نعلم أن :

$$30 \text{ rods} = (30 \text{ rods})\left(\frac{16.50 \text{ ft}}{\text{rod}}\right)$$

وهذا صحيح لأن معامل الضرب 16.50 ft/rod يساوى الوحدة . ولكن وحدة القصبات يمكن شطبها لنحصل على :

$$30 \text{ rods} = (30 \cancel{\text{rods}})\left(\frac{16.50 \text{ ft}}{\cancel{\text{rod}}}\right) = 495 \text{ ft}$$

أى اننا قد نجحنا فى اثبات ان 30 rod تساوى 495 ft وذلك باستخدام معامل التحويل .

يحتوى بطن الغلاف الأمامى لهذا الكتاب على مجموعة من معاملات التحويل المفيدة . لنأخذ الآن بعض الاستخدامات النموذجية لها .

مثال توضيحى ٢ – ٤

١ – حول 36 in (inches) الى سنتيمترات .

معامل التحويل :

2.54 cm/in

الطريقة :

$$36 \text{ in} = (36 \cancel{\text{in}}) \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{\cancel{\text{in}}}\right) = 91.44 \text{ cm}$$

٢ – حول 270 cm الى بوصات .

الطريقة :

$$270 \text{ cm} = (270 \text{ cm}) \left(\frac{1}{2.54 \text{ cm/in}}\right)$$

لاحظ أننا قسمنا على معامل التحويل فى هذه الحالة بحيث تشطب الوحدة cm بقلب المقام والضرب نحصل على :

$$270 \text{ cm} = (270 \cancel{\text{cm}}) \left(\frac{\text{in}}{2.54 \cancel{\text{cm}}}\right) = 106.3 \text{ in}$$

٣ – حول 60 acres الى هكتارات .

معاملات التحويل :

10,000 m^2/hectare   0.305 m/ft   43,560 ft^2/acre

الطريقة :

$$\begin{aligned} 60 \text{ acres} &= (60 \cancel{\text{acres}}) \left(\frac{43{,}560 \text{ ft}^2}{\cancel{\text{acre}}}\right) = 2{,}613{,}600 \text{ ft}^2 \\ &= (2{,}613{,}600 \text{ ft}^2) \left(\frac{0.305 \text{ m}}{\text{ft}}\right) \left(\frac{0.305 \text{ m}}{\text{ft}}\right) \\ &= 243{,}100 \text{ m}^2 \\ &= (243{,}100 \text{ m}^2) \left(\frac{1 \text{ hectare}}{10{,}000 \text{ m}^2}\right) = 24.3 \text{ hectares} \end{aligned}$$

سنقابل كثيرا من الاستخدامات الأخرى لمعاملات التحويل عندما نتقدم فى دراستنا .

٢ - ٤ التسارع (العجلة)

تعريف يقال ان الجسم متسارع اذا كانت سرعته متغيرة . يعرف التسارع أو العجلة بأنه التغير فى السرعة (وليس معدل الحركة !) فى وحدة الزمن . ويمكن صياغة هذا التعريف كمعادلة على الصورة :

$$\text{التسارع (العجلة)} = \frac{\text{التغير فى السرعة}}{\text{الزمن اللازم}}$$

أو :

$$\bar{a} = \frac{v_f - v_0}{t} \qquad (٢ - ٤)$$

حيث $\mathbf{v_0}$ السرعة الابتدائية ، $\mathbf{v_f}$ السرعة النهائية بعد مرور زمن قدره t . وحيث أن $\bar{\mathbf{a}}$ عبارة عن مجموع متجهين مقسوما على كمية قياسية t :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_f + (-\mathbf{v}_0)}{t}$$

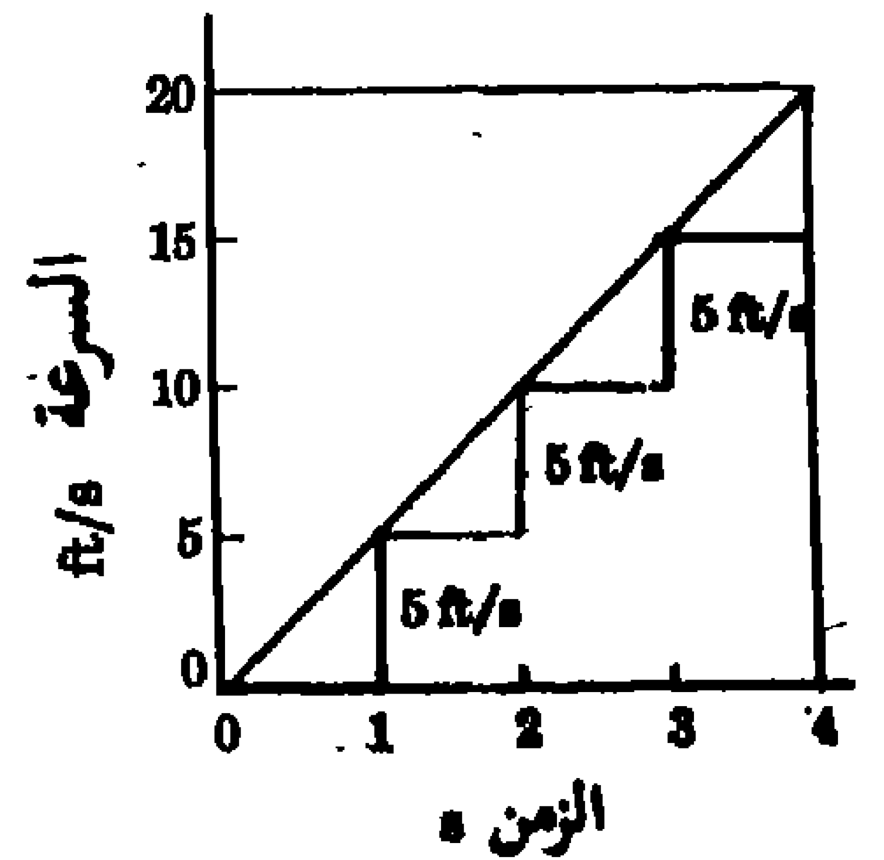
فان $\bar{\mathbf{a}}$ لابد أن تكون متجها أيضا.سنناقش فى هذا الفصل الحركة فى خط مستقيم فقط ، وعليه فان مقدار $\bar{\mathbf{a}}$ ويكتب هكذا $\bar{a}$ هو الذى سوف يهمنا دائما . ومع ذلك سوف تضاف الاشارة الموجبة أو السالبة لتوضيح ماذا كانت العجلة فى الاتجاه الموجب أو السالب من الخط .

مثال توضيحى ٢ - ٥ : لنفرض أن سيارة تبدأ من السكون ثم تتسارع (تزيد من سرعتها) الى سرعة قدرها 20 ft/s فى مسار خطى مستقيم فى زمن قدره 4 s كما هو موضح بالخط الأسود فى شكل ٢ - ٤ . أوجد متوسط التسارع .

طريقة الحل : من الشكل نجد أن $v_0 = 0$ ؛ $v_f = 20$ ft/s عند $t = 4$ s بالتعويض فى المعادلة (٢ - ٤) (مع حذف علامة المتجه حيث أن الحركة بأكملها فى نفس الاتجاه) :

$$\bar{a} = \frac{20\ \text{ft/s} - 0}{4\ \text{s}} = \frac{20\ \text{ft/s}}{4\ \text{s}} = \frac{5\ \text{ft/s}}{\text{s}}$$

وتقرأ هكذا « خمسة أقدام فى الثانية لكل الثانية » أو « خمسة اقدام فى الثانية فى الثانية » . وباسلوب آخر ، تزداد سرعة السيارة بمعدل قدره 5 ft/s لكل ثانية ، وهذا المعدل فى زيادة السرعة هو الكمية الى سميناها سابقا بالتسارع . وتكتب النتيجة السابقة للكمية $\bar{a}$ عادة على الصورة $5\ \text{ft/s}^2$ وتقرأ « خمسة اقدام فى الثانية المربعة » .



شكل (٢ - ٤)
يوضح الخط الأسود تغير السرعة مع الزمن لسيارة تتحرك بتسارع منتظم مقداره 5 ft/s لكل ثانية

وعموما فان وحدات $\bar{a}$ هى وحدة مسافة مقسومة على حاصل ضرب وحدتى زمن . ويمكن أن تكون هذه الوحدات ميلا فى الثانية المربعة ، قدما فى الثانية فى الساعة ، سنتيمترا فى الثانية فى الدقيقة ، ميلا فى الساعة فى الثانية وهلم جرا* . وعلى أى حال فان المعنى الفيزيائى للتسارع يجب أن يكون واضحا . فالتسارع هو التغير فى السرعة فى وحدة الزمن كما هو مبين فى شكل ٢ – ٤ .

٢ – ٥ الحركة منتظمة التسارع – الحركة بعجلة منتظمة

لنرجع مرة ثانية الى شكل ٢ – ٤ . لاحظ أن السرعة الممثلة فى الرسم البيانى تزداد بمعدل 5 ft/s لكل ثانية أثناء الزمن الذى يغطيه الرسم . ويعنى هذا أن معدل زيادة السرعة ، أى التسارع ، منتظم ويساوى $5 \ ft/s^2$. وبالرغم من أن التسارع المنتظم أو الثابت يتحقق فى بعض الحالات الخاصة فقط ، فاننا سنرى أن هذه الحالات فى غاية الأهمية . وحيث أن الحركة المرتبطة بالتسارع غير المنتظم من الصعب عادة معالجتها فاننا سنقصر مناقشتنا فى هذا الفصل على حالة الحركة ذات التسارع الثابت . فى هذه الحالات يكون متوسط التسارع والتسارع اللحظى متساويين لأن التسارع ثابت . بناء على ذلك لن نفرق بين هاتين الكميتين فيما تبقى من هذا الفصل .

عندما يكون التسارع ثابتا فإن معدل حركة الجسم المتحرك وسرعته تتغير بانتظام مع الزمن . لذلك فإن **متوسط السرعة** ماهو الا نصف مجموع السرعتين الإبتدائية والنهائية ، إذن : تعريف

$$\bar{v} = \frac{v_f + v_0}{2} \qquad (٢ - ٥)$$

حيث v_f السرعة النهائية و v_0 السرعة الابتدائية . وفى تلك الحالة الخاصة التى يكون فيها التسارع ثابتا ومساويا للصفر فان السرعة لاتتغير ، وعليه $v_f = v_0$. فى هذه الحالة تعطينا المعادلة (٢ – ٥) هذه القيمة $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_0) = v_0$ كما هو متوقع .

لدينا الآن ثلاث معادلات تنطبق على الحركة منتظمة التسارع وهى المعادلات (٢ – ٢) ، (٢ – ٤) ، (٢ – ٥) وهى كافية لحل المسائل العادية المتعلقة بالحركة منتظمة التسارع . لنفحص الآن حالة نموذجية .

مثال توضيحى ٢ – ٦ : افترض أن سيارة تبدأ من السكون وتتسارع بانتظام الى معدل حركة قدره 5.0 m/s فى 10 s . اوجد تسارع هذه السيارة والمسافة المقطوعة فى هذا الزمن .

طريقة الحل : لكى نبدأ حل هذه المسألة لنكتب أولا ماهو معلوم وماهو غير معلوم .

---

* عند حل المسائل يراعى عدم خلط وحدتى زمن فى نفس المسألة .

$$v_0 = 0 \qquad v_f = 5.0\ \text{m/s} \qquad t = 10\ \text{s}$$
$$a = ? \qquad s = ?$$

من المعادلة (٢ – ٤) نجد مباشرة أن :

$$a = \frac{v_f - v_0}{t} = \frac{5.0 - 0}{10}\,\frac{\text{m/s}}{\text{s}} = 0.50\ \text{m/s}^2$$

ومن المعادلة (٢ – ٥) نحصل على :

$$\bar{v} = \frac{5.0 + 0}{2} = 2.5\ \text{m/s}$$

وأخير باستخدام المعادلة (٢ – ٢) :

$$s = \bar{v}t = (2.5\ \text{m/\cancel{s}})(10\ \cancel{\text{s}}) = 25\ \text{m}$$

مثال توضيحي ٢ – ٧ : كمثال آخر افترض أن السيارة تسير بسرعة قدرها 5.0 m/s لكي تصل الى السكون بعد مسافة قدرها 20 m . اوجد التقاصر والزمن اللازم للوقوف .

طريقة الحل : باتباع نفس الطريقة السابقة ، لنكتب المعطيات والمجاهيل .

$$v_0 = 5.0\ \text{m/s} \qquad v_f = 0 \qquad s = 20\ \text{m}$$
$$a = ? \qquad t = ?$$

يمكننا أولا ايجاد متوسط السرعة :

$$\bar{v} = \tfrac{1}{2}(v_0 + v_f) = 2.5\ \text{m/s}$$

بمعلومية متوسط السرعة ومعرفة أن المسافة تعطى بالعلاقة :

$$s = \bar{v}t \quad \text{أو} \quad t = \frac{s}{\bar{v}}$$

نجد أن :

$$t = \frac{20\ \text{m}}{2.5\ \text{m/s}} = 8\ \text{s}$$

يمكننا اذن ايجاد التسارع من المعادلة (٢ – ٤) :

$$a = \frac{0 - 5.0\ \text{m/s}}{8\ \text{s}} = -0.625\ \text{m/s}^2$$

وتبين اشارة الجواب السالبة أن سرعة السيارة تتناقص ولاتزيد . أى أن التسارع فى الاتجاه السالب من خط الحركة .

يبين هذان المثالات التوضيحيان بجلاء أنه من المفيد اتباع طريقة منهجية منظمة لحل هذه المسائل . أولا تكتب المعطيات والمجاهيل ثم تستخدم المعادلة المناسبة من المعادلات (٢ – ٢) أو (٢ – ٤) أو (٢ – ٥) لايجاد المجاهيل . ولكن هناك حالات

أخرى أكثر صعوبة من المثالين التوضيحيين السابقين . لنأخذ مثالا لاحدى هذه الحالات .

مثال توضيحى ٢ - ٨ : تبدأ سيارة من السكون وتتسارع بمعدل $4.0\ m/s^2$ خلال مسافة قدرها $20\ m$. بأى سرعة تسير السيارة عندئذ ؟ وما هو الزمن الذى أخذته السيارة ؟

طريقة الحل : تكتب المعطيات والمجاهيل :

$$v_0 = 0 \qquad a = 4.0\ m/s^2 \qquad s = 20\ m$$
$$v_f = ? \qquad t = ?$$

معادلاتنا الثلاث هى :

$$s = \bar{v}t \qquad (٢ - ٢)$$

$$\bar{v} = \tfrac{1}{2}(v_0 + v_f) \qquad (٢ - ٥)$$

$$a = \frac{v_f - v_0}{t} \qquad (٢ - ٤)$$

ولكن من غير الممكن استخدام أى من هذه المعادلات مباشرة للحصول على أحد المجهولين لأن أى معادلة تحتوى على الأقل على مجهولين ، وعليه فمن الضرورى حل المعادلات الآنية للحصول على أى مجاهيل . وفى الجزء التالى سنبين كيف نتحاشى مثل هذه الحسابات .

٢ - ٦ معادلتان مشتقتان للحركة بعجلة منتظمة :

يمكن حل المثال السابق بسهولة اذا حصلنا أولا على معادلتين مصاحبتين للمعادلات الثلاث المعطاة (٢ - ٢) ، (٢ - ٤) ، (٢ - ٥) . تستنتج هاتان المعادلتان الاضافيتان بحل المعادلات الثلاث المعلومة آنيا . وبمجرد عمل ذلك لن يتحتم علينا تكرار العملية مرة أخرى ولكن يمكننا ببساطة استخدام هذه النتائج مباشرة .

بالتعويض من المعادلة (٢ - ٥) فى المعادلة (٢ - ٢) نجد أن :

$$s = \tfrac{1}{2}(v_0 + v_f)t \qquad (٢ - ٦)$$

وبالتعويض عن t من المعادلة (٢ - ٤) نحصل على :

$$s = \tfrac{1}{2}(v_f + v_0)\left(\frac{v_f - v_0}{a}\right) \qquad (٢ - ٧)$$

وبتصفية الكسور واعادة ترتيب المعادلة نجد أن :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as \qquad (٢ - ٨)$$

(لاحظ أن هذه هى المعادلة الواجب استخدامها لحل المثال السابق) .

أما المعادلة الأخرى التى نجدها مفيدة فيمكن استنتاجها باجراء تعويض آخر فى المعادلة (٢ – ٦) . بالتعويض عن v_f من المعادلة (٢ – ٤) فى المعادلة (٢ – ٦) نجد أذن أن :

$$s = \frac{1}{2}v_0 t + \frac{1}{2}(v_0 + at)t$$

التى يمكن تبسيطها الى الصورة :

$$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad (٢ - ٩)$$

لدينا الآن خمس معادلات يمكن استخدامها فى حل مسائل الحركة بعجلة منتظمة وهى :

$$s = \bar{v}t \qquad (٢ - ١٠\ أ)$$
$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f + v_0) \qquad (٢ - ١٠\ ب)$$
$$v_f = v_0 + at \qquad (٢ - ١٠\ جـ)$$
$$v_f^2 = v_0^2 + 2as \qquad (٢ - ١٠\ د)$$
$$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad (٢ - ١٠\ هـ)$$

لنرجع الآن الى المسألة المذكورة فى نهاية الجزء السابق . من نص المسألة نعلم أن :

$$v_0 = 0 \qquad a = 4.0\ \text{m/s}^2 \qquad s = 20\ \text{m}$$
$$v_f = ? \qquad t = ?$$

باستخدام المعادلة (٢ – ١٠ د) نجد مباشرة أن :

$$v_f^2 = 0 + (2)(4.0\ \text{m/s}^2)(20\ \text{m}) = 160\ \text{m}^2/\text{s}^2$$
$$v_f = \sqrt{160\ \text{m}^2/\text{s}^2} = \sqrt{160}\ \text{m/s} \approx 12.6\ \text{m/s}$$

ويمكننا الآن استخدام المعادلة (٢ – ١٠ جـ) لايجاد t :

$$(4.0\ \text{m/s}^2)t = 12.6\ \text{m/s} - 0$$
$$t = 3.15\ \text{s}$$

مثال توضيحى ٢ – ٩ : اوجد الزمن اللازم لسيارة لكى تقطع 98 ft اذ بدأت من السكون وتسارعت بمعدل $4.0\ \text{ft/s}^2$.

طريقة الحل : المعطيات :

$$v_0 = 0 \qquad a = 4.0\ \text{ft/s}^2 \qquad s = 98\ \text{ft}$$
$$t = ?$$

المعادلة المناسبة هى :

$$s = v_0t + \tfrac{1}{2}at^2$$
$$98 = 0 + 2t^2$$
$$t = \sqrt{49} = 7\ \text{s}$$

يلاحظ أننا حذفنا الوحدات من هذه المعادلات ، ولكن يمكنك ادخالها واختبار ماإذا كانت وحدات t المذكورة صحيحة أم لا .

مثال توضيحى ٢ – ١٠ : كانت سيارة تتحرك بسرعة قدرها 60 km/h عندما بدأت فى الابطاء بتقاصر قدره $1.50\ \text{m/s}^2$. ما الزمن اللازم للسيارة لكى تقطع مسافة 70 m أثناء ابطائها .

طريقة الحل : المعطيات :

$$v_0 = (60\ \text{km/h})\left(\frac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}}\right)\left(\frac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}}\right) = 16.7\ \text{m/s}$$
$$s = 70\ \text{m} \qquad a = -1.50\ \text{m/s}^2 \qquad t = ?$$

لاحظ أننا قد غيرنا وحدات السرعة الى أمتار فى الثانية حتى لانستخدم مجموعتين من وحدات المسافة والزمن فى نفس المسألة . من الواجب دائما اجراء مثل هذا النوع من التغيير .

عند اختيار المعادلة (٢ – ١٠ هـ) لحل المسألة فاننا سنواجه تعقيدات جبرية كثيرة :

$$s = v_0t + \tfrac{1}{2}at^2$$
$$70 = 16.7t + \tfrac{1}{2}(-1.50)t^2 = 16.7t - 0.75t^2$$

حيث سيضطر الطالب مرة أخرى الى استعمال الوحدات . يمكن حل هذه المعادلة من الدرجة الثانية باستخدام صيغة تجذير معادلات الدرجة الثانية . ومع ذلك فمن الأسهل عادة ايجاد أحد المجهولين أولا حتى نتجنب التعقيدات الجبرية . مثلا ، باستخدام المعادلة (٢ – ١٠ د) نجد أن :

$$v_f^2 = v_0^2 + 2as = (16.7\ \text{m/s})^2 + (2)(-1.50\ \text{m/s}^2)(70\ \text{m})$$
$$= 279\ \text{m}^2/\text{s}^2 - 210\ \text{m}^2/\text{s}^2$$

ومنه :

$$v_f = 8.3\ \text{m/s}$$

والآن باستخدام المعادلة (٢ – ١٠ جـ) :

$$v_f = v_0 + at$$
$$8.3 = 16.7 - 1.50t$$

ضع الوحدات المناسبة فى هذه المعادلة واثبت أن :

$$t = 5.6\ \text{s}$$

٢ – ٧ ملحوظة حول المعادلات

نحن لانشجع فى علم الفيزياء « اقحام » القيم فى معادلات محفوظة عن ظهر قلب ، والسبب فى ذلك بسيط . فمن السهولة بمكان أن تحفظ عددا قليلا جدا من المعادلات عن ظهر قلب ، مع العلم بمعناها ، واستخدامها فى حل جميع انواع المعادلات . وليس هناك حاجة لحفظ معادلة مختلفة لكل موقف . وحتى الآن طلبنا منك فى هذا الكتاب أن تحفظ عن ظهر قلب معادلات تعريف الجيب وجيب التمام والظل فقط .

فى هذا الفصل عن الحركة بعجلة منتظمة قد نسألك أيضا أن تحفظ المعادلتين (٢ – ١٠ ب) و (٢ – ١٠ جـ) عن ظهر قلب لانهما تعرفان متوسط السرعة والتسارع . أما المعادلة (٢ – ١٠ أ) فانها معادلة أساسية قد عرفناها سابقا بطريقة كيفية . ولكن هل من الضرورى أن نحفظ المعادلتين (٢ – ١٠ د) و (٢ – ١٠ هـ) أم لا ؟ فى الحقيقة ، يعتمد ذلك على عوامل عديدة .

هاتان المعادلتان بالطبع ماهما الا المعادلات (٢ – ١٠ أ) ، (٢ – ١٠ ب) و (٢ – ١٠ جـ) متحدة سويا بطرق مختلفة . ومع ذلك ، فان العمليات الجبرية المستخدمة فى اشتقاق هاتين المعادلتين لايجب اهمالها ، فقد رأينا فى أمثلة سابقة أن من الضرورى استنتاج هاتين المعادلتين لحل بعض مسائل الحركة . يتلخص السؤال إذن فيمايلى : هل ستستخدم هاتين المعادلتين كثيرا لدرجة ينصح معها أن تحفظ عن ظهر قلب ؟ اظن أنك ستستخدم المعادلات الخمس (٢ – ١٠) كثيرا لدرجة أننا نفضل أن تحفظها عن ظهر قلب .

بالرغم من ذلك ، من الضرورى أن نتذكر أن أية معادلة تستحق أن تحفظ فانها بالتأكيد جديرة بأن تفهم . يجب علينا أن نعلم المعنى المضبوط لكل رمز فى هذه المعادلات . بالاضافة الى ذلك فان المعادلات (٢ – ١٠ أ) ، (٢ – ١٠ ب) ، (٢ – ١٠ جـ) تلخص المعانى الفيزيائية المفهومة بسهولة ولايجب أن ينظر اليها على أنها مجموعة من التعبيرات الجبرية . وقد وضحنا كذلك أن جميع المعادلات (٢ – ١٠) باستثناء الأولى تنطبق على المواقف التى يكون التسارع a فيها ثابتا .

من الجدير بالاهتمام أحيانا أن نفحص الصور الحدية لهذه المعادلات . لنتبين الآن ماذا تقول المعادلات (٢ – ١٠) عندما يكون التسارع صفرا . لنأخذ أولا المعادلة (٢ – ١٠ جـ) . تقول هذه المعادلة أن $v_f = v_0$ عندما تكون $a = 0$ ، وهذا بالفعل صحيح ، فاذا كان التسارع مساويا للصفر فان السرعة تكون ثابتة ، أى أن السرعة النهائية تساوى السرعة الابتدائية . عند نفس الشرط تبين المعادلة (٢ – ١٠ ب) أن :

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f + v_0) = v_f = v_0$$

لأن v_f و v_0 متساويتان فى هذه الحالة . وهذه العلاقة صحيحة طبعا لأنه اذا كان التسارع مساويا للصفر فان السرعة لابد أن تكون ثابتة ، وكذلك لابد أن يكون متوسط السرعة مساويا للسرعتين الابتدائية والنهائية. بالمثل فان المعادلتين (٢ – ١٠ د) و (٢ – ١٠ هـ) تعطيان نفس النتيجة عندما يكون $a = 0$.

٢ – ٨ اكتشاف جاليليو

لن يعجب العارفون بتاريخ العلم اذا أجاب طفل اجابة خاطئة عندما تسأله : أى الكرتين احداهما تسقط أسرع من الأخرى ، الكرة الثقيلة أم الكرة الخفيفة ؟ قد يبدو معقولا أن تسقط الكرة الثقيلة أسرع من الخفيفة ، أليس كذلك ؟ لذلك فان معظم الأطفال يعطون هذه الاجابة .

وفى الحقيقة فان العبقرى الكبير ارسطو (٣٨٤ – ٣٢٢ قبل الميلاد) قد أعطى نفس هذه الأجابة ، ولم يكن هو الوحيد . فقد كان يظن عموما وحتى عام ١٦٠٠ أن الاجسام الثقيلة تسقط بالفعل أسرع من الاجسام الخفيفة . علاوة على ذلك فقد كان صحيحا أن ريش الطيور لايسقط فى الهواء بنفس سرعة سقوط الحجر ، وقد اثبت أرسطو نفسه بمناقشات فلسفية أن هذا لابد أن يكون صحيحا لجميع الأجسام الخفيفة بالمقارنة بالاجسام الثقيلة . (ودفاعا عن ارسطو يجدر بنا أن ننص على أنه كان يتكلم عن طريقة سقوط الأجسام فى الهواء وليس الفراغ) .

ولكن علماء العلوم الطبيعية لايرضون تماما بالبراهين الفلسفية للآراء التى يمكن اختبارها تجريبيا . فلو كانت الطرق الفسلفية جيدة لدرجة لايمكن معها الشك فى الاستنتاجات التى تؤدى اليها لكان ذلك شيئا رائعا . عندئذ كان يمكن استغلال كل الوقت والمجهود والمال المخصص للأبحاث العلمية الباهظة التكاليف فى أوجه أخرى ولأمكن لقليل من الفلاسفة الذين يعيشون منعزلين عن العامة فى أبراج عاجية فاخرة مجهزة بالسجاجيد المخملية أن يحلوا جميع المشاكل العلمية .

أما جاليليو (١٥٦٤ – ١٦٤٢) فقد كانت لديه الشجاعة والجرأة ليتساءل عما اذا كان ارسطو قد ارتكب خطأ فى مناقشاته الفلسفية . وقد يبدو لنا الآن من غير المشجع أن أحدا لم يحاول أن يجهد نفسه باجراء الاختبارات التجريبية البسيطة اللازمة للاجابة على هذا السؤال طوال تسعة عشر قرنا . ومع ذلك كان جاليليو أن يقيس السرعة التى تسقط بها الأجسام* . وقد أدرك أن تلك المواقف مثل مسألة سقوط

* أمكن لجاليليو بالفعل زيادة زمن السقوط بدحرجة الكرات على مستوى مائل . وبجعل المستوى أكثر انحدارا ومشاهدة تأثير هذا الاجراء تمكن جاليليو من الحصول على استنتاجات كمية عن سلوك الأجسام أثناء السقوط الذاتى .

ريشة الطائر والحجر لم تكن اختبارا حقيقيا نظرا للتأثير الكبير لدفع الهواء للريشة أثناء سقوطها . لذلك فانه اجرى تجاربه باستخدام أجسام ثقيلة نسبيا متساوية فى الحجم ومختلفة فى الوزن ، وبالطبع فان نتائجه معروفة جيدا . وقد استنتج أنه اذا اهملت التأثيرات الاحتكاكية للهواء فان جميع الأجسام تسقط على الأرض بنفس الطريقة بصرف النظر عن وزنها .

يسمى جاليليو عادة أبا العلم الحديث لأنه كان ذا أثر فى توجيه انتباه العالم الى أن التخريب – أى اجراء التجارب العلمية – عندما يكون ممكنا ، هو احد الطرق لتعلم الحقائق من الطبيعة . وبتتبع خطاه فتح العالمان الكبيران نيوتن وفاراداى وكثيرون غيرهما آفاقا جديدة كاملة للمعرفة بقياساتهم التجريبية لطرق الطبيعة .

وحتى فى وقتنا الحاضر نجد أحيانا بعض العلماء يتبعون طريقة ارسطو وليس جاليليو ، اذ لازلنا نجد ، بالمناسبة ، أن التجارب تدحض الافكار التى كنا نظنها متينة الأساس . وأحيانا لايمكن الحصول على البراهين التجريبية لانها تتطلب طرقا فوق امكانياتنا . ولكن ، على أى حال ، لايجب على العلماء أن ينسوا أنه حتى أحسن العقول تخطىء أخطاء فلسفية .

ومع ذلك ، هناك وجه آخر للعملة . فى كثير من المجالات تكون الاثباتات والبراهين التجريبية غير الممكنة لسبب أو لآخر. ففى مثل هذه الحالات ليس هناك بديل آخر الا أن نعتمد على استنتاجات أكثر فلاسفتنا قدرة . وحتى اذا كانت الاختبارات التجريبية ممكنة فقد يضطر العلماء الى تأجيلها بسبب ضغط المهام الأخرى أو التكاليف الباهظة . وسنرى فى فصول لاحقة أن بعضا من أعظم الاكتشافات والنظريات العلمية لم تكن مبنية على أسس غير محققة ، بل كانت مبنية على أسس غير صحيحة . ولكن حقيقة أن الاكتشافات التى قد تمت تعتبر بمثابة تبرير معقول للطريقة التى اتبعها العالم . وبالتأكيد فانه لم يكن قادرا على برهان فروضه الابتدائية فلو أنه أنفق سنوات كثيرة فى هذا البرهان لتأخر الاكتشاف قرنا كاملا . وبالطبع فاننا نميل الى أن نتذكر هؤلاء العلماء الذين كانوا محظوظين فى هذا الاسلوب . أما أولئك الذين فشلوا بسبب مقدمات خاطئة أو غير مثبتة فانهم ينسون سريعا بالرغم من أن عددهم كبير جدا بالتأكيد .

٢ – ٩ السقوط الطليق وتسارع الجاذبية

كرر كثير من العلماء التجريبيين تجارب جاليليو باستخدام أساليب تقنية متطورة للغاية ، لذلك فمن المستبعد أن تقوم فى عملك المعملى باجراء تجربة لتحقيق نتائجه . ومن الحقائق المسلم بها الآن أن الجسم الذى يسقط ذاتيا يتسارع الى أسفل بتسارع ثابت . وبالرغم من أن القيمة المضبوطة لهذا التسارع الناتج من جذب الجاذبية الأرضية يختلف من مكان الى مكان على الأرض فانه قريب من القيمة $9.8\,m/s^2$ وهو مايساوى $980\ cm/s^2$ أو $32.2\ ft/s^2$ ، ويوضح الجدول

٢ – ١ بعض القيم النموذجية . وبالطبع فان هذه النتائج تفترض أن عناية كبيرة قد أوليت لتقليل تأثير اندفاع الهواء على الجسم الساقط الى الحد الأدنى .

تعتبر حركة الجسم الحر فى الاتجاه الى أعلى أو الى أسفل حركة منتظمة التسارع ، فالتسارع فى هذه الحالة ثابت ويساوى $9.8\ m/s^2$ تقريبا* . بناء على ذلك تنطبق المعادلات (٢ – ١٠) ، على هذه الحالة ومعروف أن a تساوى $9.8\ m/s^2$ أو $32\ ft/s^2$ أو $980\ cm/s^2$. هناك أيضا احتياط اضافى آخر يجب وضعه فى الاعتبار عند استخدام هذه المعادلات وهو يتعلق بالطبيعة الموجهة للتسارع . تسارع الجاذبية تتجه دائما الى أسفل . فاذا اخترنا الاتجاه الى أسفل كاتجاه موجب فان a ستكون عددا موجبا ، $9.8\ m/s^2$. أما اذا اخترنا الاتجاه الى أعلى كاتجاه موجب فإن جذب الجاذبية الأرضية سيقلل سرعة الجسم فى الاتجاه الى أعلى، وعليه فان $a = -9.8\ m/s^2$. وفى المسائل التى تحتوى على حركة فى الاتجاهين الى أعلى والى أسفل ، مثل حركة كرة ترتفع الى أعلى ثم تهبط الى أسفل ، من الضرورى جدا فى البداية اختيار أحد الاتجاهين الى أعلى أو الى أسفل كاتجاه موجب . هذا الاختيار عشوائى ، ولكن بمجرد اجراء هذا الاختيار فى مسألة معينة يجب علينا الاحتفاظ به فى المسألة كلها .

جدول ٢ – ١

تسارع الجاذبية g

المكان	الارتفاع ، m	g m/s^2	g ft/s^2
بوفورت	1	9.7973	32.143
نيوأورليانز	2	9.7932	32.130
جالفستون	3	9.7927	32.128
سيتل	58	9.8073	32.176
سان فرنسيسكو	114	9.7997	32.151
سان لويس	154	9.8000	32.152
كلفلاند	210	9.8024	32.160
دنفر	1638	9.7961	32.139
بايكس بيك	4293	9.7895	32.118

مثال توضيحى ٢ – ١١ : اسقط صبى حجرا من فوق الكوبرى . فاذا أخذ الحجر زمنا قدره $3.0\ s$ ليصطدم بالماء تحت الكوبرى فما ارتفاع الكوبرى عن الماء ؟ اهمل احتكاك الهواء . (لاحظ هنا أن مسألتنا تنتهى فى اللحظة التى تسبق اصطدام الحجر بالماء مباشرة ، لأن هذه هى فى الواقع الفترة التى يسقط فيها الجسم (الحجر) سقوطا ذاتيا) .

* لحل المسائل فى هذا الكتاب سنستخدم القيم التقريبة $32\ ft/s^2$ و $9.8\ m/s^2$ كقيم لتسارع الجاذبية g

طريقة الحل : المعطيات :

$s = ?$ الاتجاه الموجب لأسفل $a = 9.8\ m/s^2$

$v_0 = 0$ $t = 3.0\ s$

استخدام العلاقة

$$s = v_0t + \tfrac{1}{2}at^2$$
$$= 0 + \tfrac{1}{2}(9.8\ m/s^2)(9\ s^2) = 44\ m$$

مثال توضيحى ٢ – ١٢ : قذفت فتاة كرة الى أعلى بسرعة قدرها 15 m/s . ماهو أقصى ارتفاع تصل اليه الكرة ؟ وماهى سرعتها قبل أن تتلقفها الفتاة مرة ثانية ؟ ماهو الزمن الذى تقضيه الكرة فى الهواء ؟ اهمل تأثير احتكاك الهواء .

طريقة الحل : الطريقة ١ : من المهم تعريف « الرحلة » التى ندرسها . اعتبر الحركة من A الى B فى شكل ٢ – ٥ . المعطيات :

$s = ?$ الاتجاه الموجب الى أعلى $a = -9.8\ m/s^2$

$v_f = 0$ $v_0 = 15\ m/s$

استخدم العلاقة

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$
$$-19.6s = 0 - 225$$

ضع الوحدات فى هذه المعادلة واثبت أن :

من A الى B $s = 11.5\ m$

لاحظ أن سرعة الكرة الى أعلى قد تناقصت الى الصفر عند قمة المسار وهو النقطة B .

وحيث أنها لم تبدأ بعد فى السقوط الى أسفل مرة ثانية فان سرعتها الى أسفل تساوى صفرا أيضا عند هذه النقطة B .

فى الجزء الثانى من المسألة سنهتم بالرحلة من B الى C وهذه رحلة جديدة ، لذلك سيكون لدينا معطيات جديدة . المعطيات :

$v_f = ?$ الاتجاه الموجب الى أسفل $a = +9.8\ m/s^2$

$s = 11.5\ m$

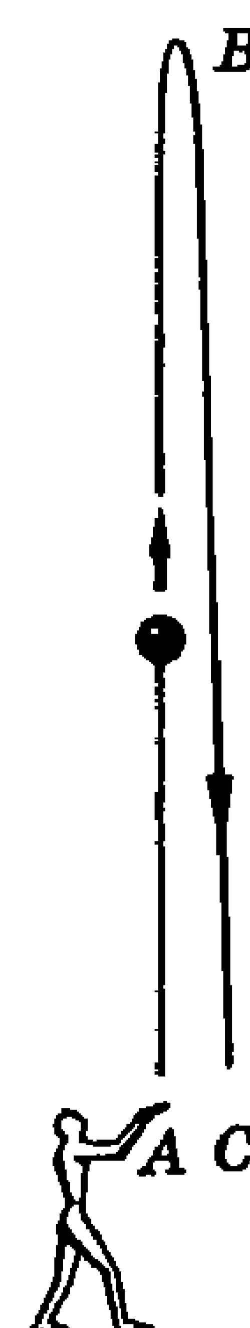
$v_0 = 0$

استخدم العلاقة :

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$
$$(19.6\ m/s^2)(11.5\ m) = v_f^2 - 0$$
$$v_f = \sqrt{225} = 15\ m/s$$ الى أسفل

شكل (٢ – ٥)

قذفت الكرة الى أعلى من النقطة A بسرعة قدرها 15 m/s وحيث أن الكرة تقف عند B فان سرعتها الى أعلى تساوى صفرا فى هذا المكان .



لاحظ أن السرعة النهائية هى نفس السرعة التى قذفت بها الكرة . هذا المثال هو مثال مشهور لقانون أساسى فى الفيزياء يسمى **قانون بقاء الطاقة** وهو ماسندرسه بتفصيل واف فى فصل لاحق .

الطريقة ٢ : لازالت هناك طريقة أخرى كان من الممكن استخدامها لحل المسألة الأخيرة . لندرس الرحلة الكلية من A الى B ثم الى C . وكما هو واضح فان نقطة البداية هى A ونقطة النهاية هى C لنأخذ الاتجاه الى أعلى كاتجاه موجب . المعطيات :

$$a = -9.8 \text{ m/s}^2 \qquad v_0 = 15 \text{ m/s} \qquad s = 0$$
$$v_f = ? \qquad t = ?$$

يمكننا القول أن الازاحة الموجهة s من نقطة البداية A الى نقطة النهاية C تساوى صفرا لأن الكرة قد عادت الى الفتاة التى قذفتها . استخدم العلاقة :

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$
$$0 = v_f^2 - (15 \text{ m/s})^2$$
$$v_f = \pm 15 \text{ m/s} \qquad \text{كما سبق}$$

لاحظ عند أخذ الجذر التربيعى لعدد معين أن الاجابة قد تكون موجبة أو سالبة . وفى رحلتنا هذه تكون الاشارة السالبة هى الصحيحة . وقبل مناقشة سبب اختيار احدى الاجابتين لنحسب الزمن اللازم للرحلة . استخدم العلاقة :

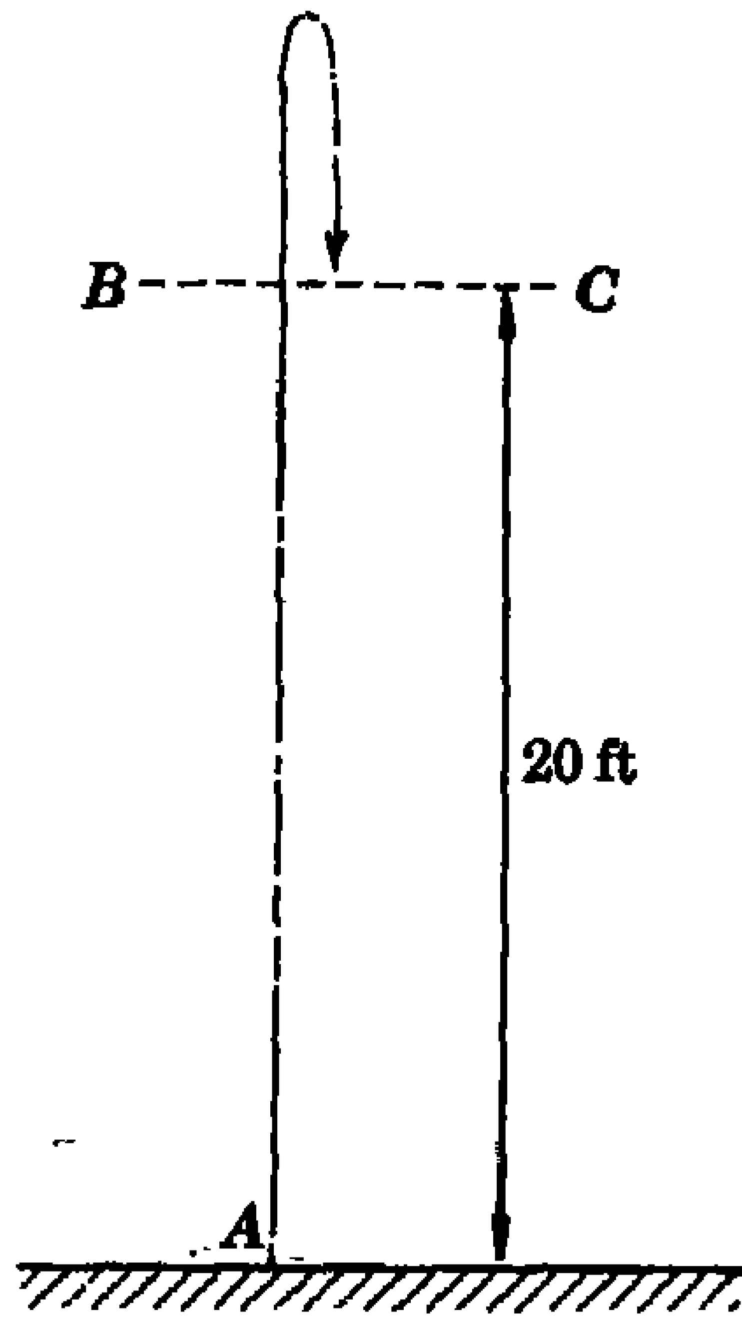
$$s = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$
$$0 = 15t - 4.9t^2$$

ضع الوحدات فى هذه المعادلة واثبت أن :

$$t = 0 \qquad t = 3.1 \text{ s}$$

هنا أيضا علينا أن نختار احدى الاجابتين .

ليس صعبا أن نختار احدى الاجابتين فى كل حالة . معطياتنا فى هذه الطريقة للحل صحيحة فعلا للرحلتين وهما الرحلة من A الى B ثم الى C وكذلك للرحلة من A والتى تنتهى بعد بدايتها مباشرة . وتعتبر الشروط المعطاة صحيحة بالنسبة لهذه الرحلة الأخيرة ، والزمن اللازم لها يساوى صفرا . بالاضافة الى ذلك فان السرعة النهائية لازالت تساوى السرعة الابتدائية .



شكل (٢ - ٦)
قذفت الكرة الى أعلى من النقطة A بسرعة قدرها 40 ft/s ماهو الزمن اللازم لكى تصل الكرة الى النقطة C ؟

مثال توضيحى ٢ - ١٣ : قذفت كرة الى أعلى بسرعة قدرها 40 ft/s كما هو موضح فى شكل ٢ - ٦ ماهو الزمن اللازم لكى تصل الى نقطة على ارتفاع 20 ft من الأرض أثناء عودتها الى أسفل مرة ثانية ؟ اهمل تأثيرات الهواء المحيط .

طريقة الحل : المعطيات :

$a = -32\ \text{ft/s}^2$ الاتجاه الموجب الى أعلى $t = ?$
$s = 20\ \text{ft} \qquad v_0 = 40\ \text{ft/s}$

اذا استخدمنا المعادلة $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ سنحتاج الى صيغة تجذير معادلات الدرجة الثانية لايجاد t . بدلا من ذلك نوجد اولا v_f باستخدام :

$$2as = v_f^2 - v_0^2$$
$$(-64\ \text{ft/s}^2)(20\ \text{ft}) = v_f^2 - 1600\ \text{ft}^2/\text{s}^2$$
$$v_f^2 = 320\ \text{ft}^2/\text{s}^2$$
$$v_f = \pm 17.9\ \text{ft/s}$$

هنا لابد أن نختار الاشارة السالبة لأننا نهتم بالكرة عند وصولها الى النقطة C فى طريق عودتها الى أسفل . أما الاشارة الموجبة فانها تمثل الكرة عند النقطة B فى طريق صعودها الى أعلى . والآن استخدم

$$v_f = v_0 + at$$
$$-17.9\ \text{ft/s} = 40\ \text{ft/s} - (32\ \text{ft/s}^2)t$$
$$32t = 57.9$$

ضع الوحدات فى هذه المعادلة واثبت أن :

$$t = 1.81\ \text{s}$$

مثال توضيحى ٢ – ١٤ : بأى سرعة يجب قذف الكرة الى أعلى فى خط مستقيم بحيث تصل الى القاذف بعد زمن قدره 3.0 s ؟ اهمل تأثيرات الهواء على الكرة .

طريقة الحل : لنستخدم النظام المترى للوحدات فى هذه المسألة . لنعتبر أن الاتجاه الى أعلى هو الاتجاه الموجب ونلاحظ أن طول متجه الازاحة من نقطة البداية الى نقطة النهاية يساوى صفرا . اذن :

$$a = -9.8\ \text{m/s}^2$$
$$t = 3.0\ \text{s} \qquad s = 0 \qquad v_0 = ?$$

يمكن استخدام العلاقة :

$$s = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

لنحصل على :

$$0 = (v_0)(3\ \text{s}) - (4.9\ \text{m/s}^2)(9\ \text{s}^2)$$

وهكذا نجد أن :

$$v_0 = 14.7\ \text{m/s}$$

ملخص :

متوسط معدل حركة الجسم $\bar{u}$ هو المسافة الكلية المقطوعة مقسومة على الزمن الذى تأخذه الرحلة . ومتوسط سرعة الجسم $\bar{\mathbf{v}}$ هو متجه الازاحة من بداية الرحلة الى نهايتها مقسوما على الزمن اللازم لقطع الرحلة . معدل الحركة كمية قياسية والسرعة متجه . وحدات كل منهما عبارة عن وحدات المسافة مقسومة على الزمن .

عندما يتحرك جسم فى خط مستقيم فان حركته يمكن تمثيلها على صورة علاقة بيانية بين x و t . ميل الخط المستقيم الذى يمثل هذه العلاقة عند أى نقطة هو السرعة ومعدل الحركة عند هذه النقطة . تعطى السرعة اللحظية بالعلاقة :

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

تستخدم معاملات التحويل لتغيير وحدات الكمية . وكل معامل تحويل يساوى الوحدة لذلك فان ضرب الكمية فى معامل التحويل لايغير قيمة هذه الكمية . تعامل الوحدات فى الحسابات مثل الرموز الجبرية بالضبط .

اذا تغيرت سرعة الجسم من $\mathbf{v}_0$ الى $\mathbf{v}_f$ فى زمن قدره t فان متوسط التسارع يعطى بالعلاقة :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\text{التغير فى السرعة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t}$$

الازاحة عبارة عن متجه .

اذا تحرك جسم فى خط مستقيم وكان تسارعه ثابتا فان متوسط سرعة الجسم تعطى العلاقة :

$$\bar{v} = \tfrac{1}{2}(v_f + v_0)$$

وباستخدام العلاقة السابقة وتعريف متوسط السرعة نجد أن :

$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

كذلك فان متوسط التسارع هو :

$$\bar{a} = a = \frac{v_f - v_0}{t}$$

يمكن اشتقاق معادلتين مفيدتين اضافيتين وهما :

$$s = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 \qquad \text{و} \qquad v_f^2 = v_0^2 + 2as$$

تجذب الأرض جميع الأجسام الى أسفل بقوة تسمى وزن الجسم . واذا كانت هذه القوة هى القوة الوحيدة التى تؤثر على الجسم يقال عندئذ أن الجسم يسقط سقوطا ذاتيا . تكتسب الأجسام التى تسقط سقوطا ذاتيا التسارع g فى اتجاه مركز الأرض . قيمة تسارع الجاذبية g هى $9.8\ m/s^2$ وهو مايساوى $32.2\ ft/s^2$.

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل التالى :

١ – تعريف متوسط معدل الحركة ومتوسط السرعة . اعطاء أمثلة توضح أن مقدارى السرعة ومعدل الحركة يكونان أحيانا مختلفين .

٢ – استخدام الرسم البيانى الذى يمثل العلاقة بين x و t لوصف سلوك الجسم.تفسير ميل الرسم البيانى بدلالة السرعة ومعدل الحركة اللحظيين . التفريق بين متوسط السرعة والسرعة اللحظية .

٣ – تغيير وحدات الكمية من نظام الى آخر عند معرفة علاقات تحويل الوحدات .

٤ – تعريف متوسط التسارع بالكلمات وبمعادلة رياضية . اعطاء بعض وحدات التسارع الممكنة .

٥ – رسم علاقة بيانية تمثل العلاقة بين v و t لجسم يتحرك بتسارع ثابت (منتظم) معلوم .

٦ – كتابة معادلات الحركة منتظمة التسارع الخمس . تعريف كل رمز فى هذه المعادلات . ذكر شروط استخدام كل معادلة .

٧ – ايجاد مجهول أو مجهولين لجسم يتحرك بتسارع منتظم عند معرفة المعطيات الكافية .

٨ – تعريف تسارع الجاذبية g وذكر قيمتها التقريبية على الأرض .

٩ – ايجاد مجهول أو مجهولين لحالة الجسم الذى يتحرك حركة رأسية أثناء السقوط الذاتى على الأرض عند معرفة المعطيات الكافية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

متوسط معدل الحركة

متوسط السرعة

اختلاف المسافة عن الازاحة

متوسط التسارع

معدل الحركة والسرعة اللحظيين

السرعة بدلالة الميل

تسارع السقوط الذاتى g

معادلات الحركة المنتظمة الخمس

ضرورة اختيار اتجاه موجب

معامل التحويل

اسئلة وتخمينات

١ – اذكر مثالا تكون فيه سرعة الجسم مساوية للصفر بينما لايكون تسارعه مساويا للصفر .

٢ – هل يمكن أن يكون اتجاه سرعة الجسم مختلفا عن اتجاه تسارعه ؟ إشرح ذلك .

٣ – ارسم الرسمين البيانيين الذين يمثلان السرعة والتسارع كدالة للزمن لسيارة تصطدم بعمود حمل الأسلاك التليفونية . كرر العمل لكرة بلياردو تصطدم اصطداما مستقيما (مباشرا) مع حافة منضدة البلياردو .

٤ – اعتبر أن صاروخا صغيرا قد اطلق فى خط مستقيم الى أعلى . ارسم الرسمين البيانيين اللذين يمثلان السرعة والتسارع كدالة للزمن للصاروخ أثناء ارتفاعه ثم أثناء سقوطه الى الأرض بفرض أنه يبدأ من السكون ويتسارع بانتظام حتى تمام استنفاذ الوقود .

٥ – دخل فأر احدى نهايتى ماسورة مجارى طولها L وكانت حركته ابتداء من تلك اللحظة كما هو مبين فى شكل م ٢ – ١ . صف حركة الفأر بالكلمات .

٦ – قذف حجر فى الهواء رأسيا الى أعلى ، فوصل الى ارتفاع h ثم عاد مرة أخرى الى القاذف . ارسم العلاقات البيانية التى تبين تغير y مع t و v مع t و a مع t فى الفترة التى كان الحجر موجودا فيها فى الهواء .

٧ – تقطع فتاة بالمرحلة الثانوية مسافة 100-yd dash باكمال مسار دائرى طول محيطه 50 yd فى حديقة منزلها . قدر متوسط معدل حركة الفتاة ومتوسط سرعتها باعتبارها عداء متوسط القدرة (ق) .

٨ – هل تسقط جميع الأجسام على الأرض بنفس التسارع ؟ اشرح ذلك .

٩ – اسقطت سيدة مفاتيح سيارتها فى المصعد الذى كانت واقفة فيه . وفى نفس اللحظة انقطع سلك المصعد وسقط المصعد فى مجراه الرأسى سقوطا حرا . ماذا يحدث للمفاتيح .

١٠ – رأى سائق سيارة طفلا مندفعا فى الطريق الذى يسير فيه مباشرة ، وكانت سرعة السيارة هى 200 m/s . ما هى المسافة التى تقطعها السيارة قبل أن يضغط السائق على الفرامل و (ق) (سنرى فى الفصل الرابع أن السيارة سوف تنزلق بعد الضغط على الفرامل) .

١١ – تسارع الجاذبية على القمر يساوى حوالى $1.6\ m/s^2$. قدر الى أى ارتفاع يمكنك أن تقذف كرة بيسبول رأسيا الى أعلى على القمر . (افترض أن بذلة الفضاء التى ترتديها لاتسبب أى اعاقة) . (ق) .

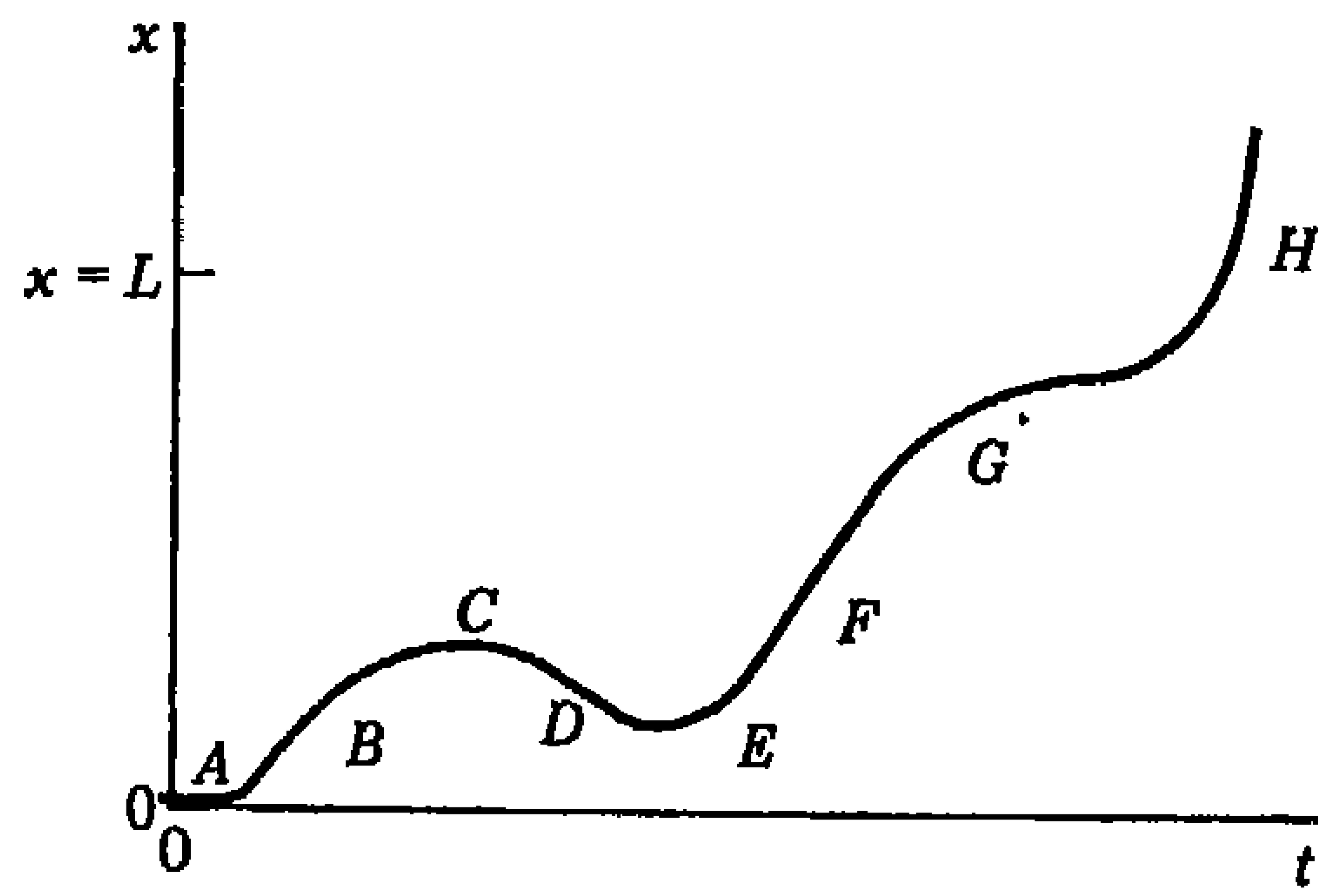
١٢ – ماهو الحد الأقصى لمتوسط تسارع سيارة قياسية فى المدى من 0 إلى 40 mi/h ؟ (ق)

١٣ – افترض أنك تجرى بسرعة قدرها 5 m/s فى منتزة أخضر . قدر أقل مسافة يمكنك التوقف فيها دون أن تصطدم بشىء ما . وباستخدام تقديرك أوجد تقاصرك ، أى تسارعك السالب . (ق) .

مسائل :

افترض أن التسارع منتظم مالم ينص على غير ذلك . اعتبر أن $g = 9.8\ m/s^2 = 32\ ft/s^2$. اهمل احتكاك الهواء .

١ – فى عام ١٩٠٤ سجل هنرى فورد رقما قياسيا عالميا للميل ، فقد قطع هذه المسافة فى سيارة فورد « ٩٩٩ » فى زمن قدره 39.4 s . ماهو متوسط معدل الحركة بالميل فى الساعة والكيلومتر فى الساعة ؟



شكل (م ٢ – ١)

٢ – فى دورة ١٩٣٢ للألعاب الأوليمبية كسب الفنلندى سباق 3000 m حواجز اذ قطع مسافة 3450 m فى زمن قدره 10 min 33.4 s (جرى العداءون مسافة اضافية لخطأ فى القياس) . ماهو متوسط معدل حركته بالمتر فى الثانية ؟ وماهو متوسط سرعته ؟

٣ – مازالت القشرة الأرضية فى طور التكيف نظرا لفقد الثلج منذ العصر الجليدى الأخير . لذلك فان منطقة ليك سوبيريور مازالت ترتفع بمعدل قدره حوالى 16 ft لكل 1000 yr . اوجد معدل الحركة نتيجة لذلك بالسنتيمترات فى السنة . اوجد متوسط السرعة بالسنتيمترات فى القرن .

٤ – طبقا لنظرية زحزحة القارات كانت أمريكا الجنوبية فى وقت ما متصلة بافريقيا ، وقد استمرت زحزحة هاتين القارتين متباعدتين لحوالى 200 million years حتى بلغ انفصالهما فى الوقت الحاضر حوالى 4000 mi . بفرض أن هذين الرقمين مضبوطين ، ماهو متوسط معدل انفصال هاتين القارتين بالسنتيمترات فى السنة ؟

٥ – بالرجوع الى شكل م ٢ – ٢ الذى يبين حركة جسم ما فى خط مستقيم .اوجد متوسط سرعة هذا الجسم فى الفترات التالية : (أ) من A الى E (ب) من B الى E ، (جـ) من C الى E ، (د) من D الى E ، (هـ) من C الى D .

٦ – يستطيع A أن يجرى بمعدل حركة قدره 5.0 m/s بينما يستطيع B أن يجرى بمعدل حركة قدره 3.0 m/s فقط . تسابق A و B مسافة 200 m ولكى يكون السباق اكثر تعادلا طلب A أن يبدأ بعد t seconds من لحظة انطلاق B . ماقيمة t اذا اريد أن يصل المتسابقان فى نفس اللحظة الى نقطة النهاية ؟

٧–* يمكن اجراء السباق المذكور فى المسألة ٦ بالطريقة التالية . يبدأ B السباق من نقطة تبعد s من نقطة البداية ، بينما يبدأ A السباق من نقطة البداية ليجرى المسافة الكلية 200 m وتعطى اشارة البدء لكليهما فى نفس اللحظة . ماقيمة s اللازمة لكى يصل المتسابقان الى نقطة النهاية فى نفس اللحظة ؟

٨ – يمثل الشكل م ٢ – ٢ حركة جسم ما فى خط مستقيم . اوجد السرعة اللحظية للجسم (أ) عند النقطة F ، (ب) عند النقطة B ، (جـ) عند النقطة E .

٩ – يطالب صانع سيارات أن تصل سيارته الى سرعة قدرها 28 m/s بعد زمن قدره 20 S من لحظة انطلاقها من السكون . اوجد متوسط تسارع السيارة والمسافة التى تقطعها فى هذا الزمن .

١٠ – القيمة التقريبية لتقاصر سيارة متزحلقة هو $7.0\ m/s^2$.باستخدام هذه القيمة احسب الزمن لسيارة تسير بسرعة قدرها 30 m/s لكى تقف بعد بداية التزحلق . ماهى المسافة التى تقطعها السيارة فى هذا الزمن ؟

١١ – تتحرك رصاصة بمعدل حركة قدره 150 m/s لتصيب شجرة فتنفذ فيها مسافة 3.5 cm قبل وقوفها . اوجد تقاصر الرصاصة والزمن اللازم لوقوفها .

١٢ – فى انبوبة التليفزيون تتحرك الالكترونات بسرعة كبيرة لتصطدم بالمادة الفلورية الموجودة على الستار فى نهاية الانبوبة . ويسبب اصطدامها بهذه المادة انبعاث الضوء لتنتج الصورة التى نراها . فى هذه الانبوبة تتسارع الالكترونات من السكون الى معدل حركة قدره حوالى 200 million meters per second فى مسافة قدرها حوالى 1.5 cm (يمكن كتابة معدل الحركة على الصورة 2×10^8 m/s باستخدام التدوين المشروح فى ملحق ٢) . ماهو تسارع الالكترون فى خلال عملية التسارع ؟ ماالزمن اللازم لعملية التسارع ؟

١٣* – سد قطار محمل بحمولة كبيرة تقاطعا (مزلقانا) فاضطر أحد سائقى السيارات الى التوقف والانتظار حتى ينتهى عبور القطار . وقد لاحظ هذا السائق أن عربة السكة الحديد تحتاج 20 s لكى تعبر التقاطع تماما عندما يبدأ القطار الحركة من السكون . اوجد تسارع القطار بدلالة طول عربة السكة الحديد L . وبفرض أن التسارع يظل ثابتا ، اوجد الزمن اللازم لعبور عربات السكة الحديد التالية وعددها 60 بعد أن يبدأ القطار فى الحركة .

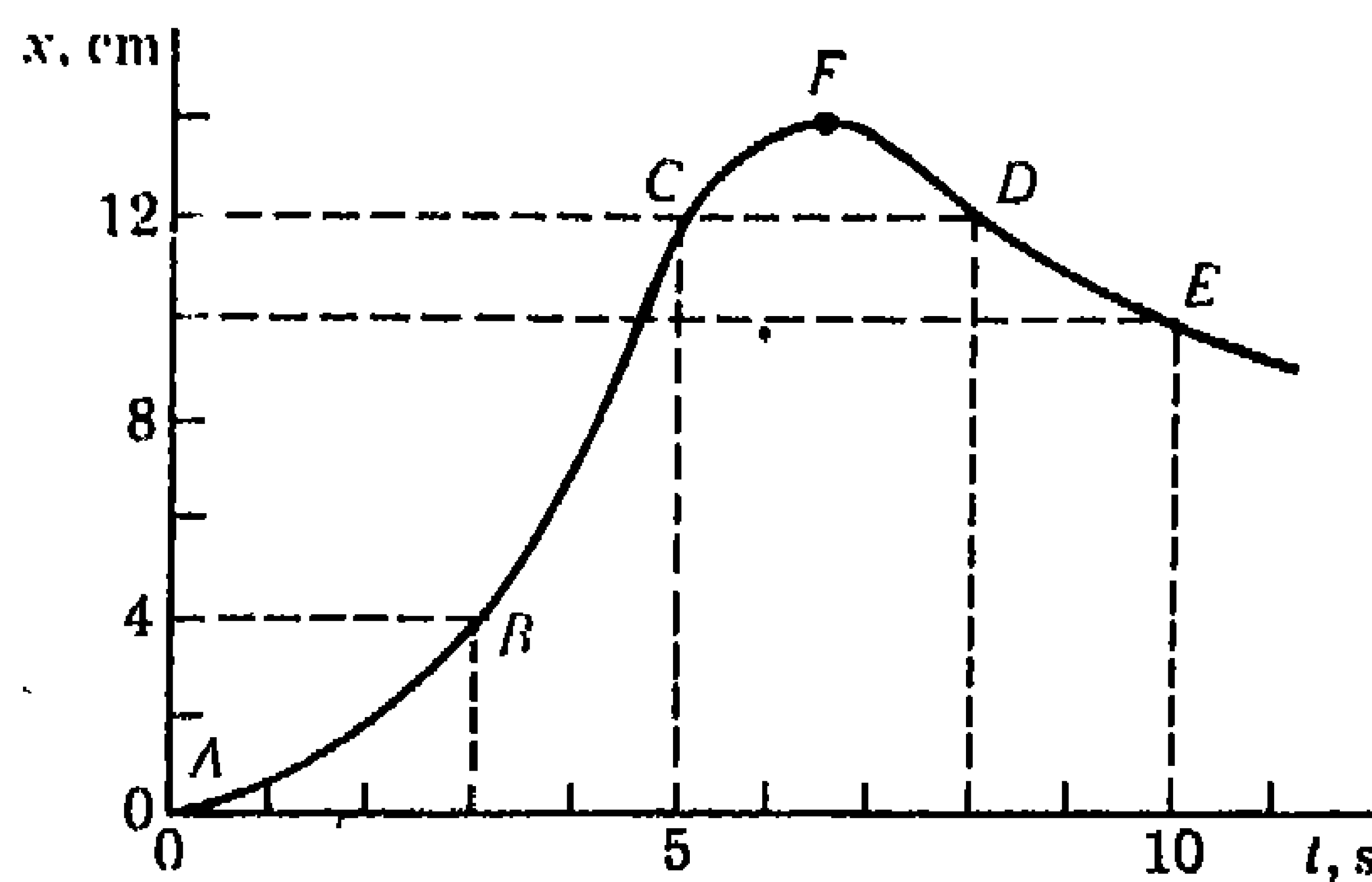
١٤ – تسير شاحنة بسرعة ابتدائية قدرها 50 ft/s وتبطىء سرعتها بتقاصر قدره $4\ ft/s^2$. اوجد (أ) الزمن الذى تأخذه للوقوف ، (ب) المسافة التى تقطعها فى هذا الزمن ، (جـ) المسافة التى تقطعها الشاحنة فى الثانية الثالثة بعد الضغط على الفرامل .

١٥ – قذف حجر رأسيا الى أعلى بسرعة ابتدائية قدرها 80 ft/s . اوجد أقصى ارتفاع يصل اليه الحجر والزمن اللازم للوصول الى هذا الارتفاع .

١٦ – قذف طفل كرة رأسيا الى أسفل من قمة مبنى ارتفاعه 50 ft بسرعة قدرها 20 ft/s . ماهو الزمن اللازم لكى تصل الكرة الى الأرض وسرعتها قبل أن تصطدم بها .

١٧ – اطلقت رصاصة من بندقية رأسيا الى أعلى فوجد أنها تصل الى ارتفاع 2 km . ماهى أقل سرعة ممكنة لانطلاق الرصاصة من البندقية حتى تصل الى هذا الارتفاع ؟ (احتكاك الهواء هام من الناحية العملية) .

١٨ – قذف حجر رأسيا الى أعلى من سطح الأرض فوصل الى ارتفاع يساوى ارتفاع مبنى قريب ثم عاد الى الأرض بعد 3.0 s من لحظة القذف ماارتفاع هذا المبنى بالأمتار ؟



شكل (م ٢ – ٢)

١٩ – تقف فتاة على الحافة العليا لمبنى ارتفاعه 18 m من سطح الأرض فاذا نقرت هذه الفتاة قطعة عملة معدنية نقرة خفيفة الى أعلى بسرعة قدرها 7.0 m/s ، فما هو الزمن اللازم لكى تصل قطعة العملة الى سطح الأرض ؟ وماهى سرعة قطعة العملة قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟

٢٠* طالب فيزياء يستخدم آلة حاسبة لايجاد قيمة 2×2 توصل الى الطريقة التالية لقياس ارتفاع احد المبانى . يسقط حجر من قمة المبنى الى الأرض ثم يقاس الزمن اللازم لكى يقطع الحجر المسافة 2.0 m الأخيرة قبل ان يصطدم بالأرض وذلك باستخدام جهاز توقيت . وقد وجد الطالب بالتجربة أن الجسم الذى اسقطه من قمة المبنى قد أخذ زمنا قدره 0.150 s لقطع المسافة 2.0 m الأخيرة . ماارتفاع هذا المبنى ؟

٢١ – تتحرك شاحنة بسرعة قدرها 15 m/s فى الاتجاه الغربى فى مسار الاصطدام بسيارة تتحرك فى الاتجاه الشرق بسرعة قدرها 30 m/s وكانت المسافة بين السيارتين 400 m . ماهو الزمن اللازم لاصطدامهما ؟ على أى مسافة تبعد كل سيارة عن موضعها الأصلى عندما يحدث التصادم ؟ افترض أن سرعتى السيارتين تظلان ثابتتين .

٢٢** – تسير سيارة بسرعة قدرها 60 mi/h فى طريق مواز لخط السكة الحديد . ماهو الزمن اللازم للسيارة لكى تجتاز قطارا طوله $\frac{1}{2}$ mi يتحرك بسرعة قدرها 40 mi/h فى نفس الاتجاه ؟ وماهو الزمن اللازم لذلك اذا كان القطار يتحرك فى الاتجاه المعاكس ؟

٢٣** – لاحظ سائق سيارة أن سرعة سيارته 30 m/s فى المنطقة المخصصة للسرعة 20 m/s ، وفى نفس اللحظة شاهد سيارة شرطة مختفية خلف شجرة . وعلى أمل ألا يكون رجال الشرطة مزودين بجهاز رادار قياس السرعة رفع السائق قدمه فجأة عن دواسة البنزين . فاذا علمت أن رجال الشرطة يقومون برصد سرعة السيارات بين نقطتى مراجعة تبعد كل منها عن الأخرى مسافة 150 m وكانت نقطة المراجعة الأولى منطبقة على النقطة التى اعتقت فيها دواسة البنزين ، فبأى تقاصر يجب أن تسير السيارة لكى يسجل رجال الشرطة سرعة قدرها 20 m/s ؟

٢٤** – يريد صبى أن يقذف علبة من الصفيح رأسيا الى أعلى فى الهواء ثم يضربها بعلبة أخرى ، وكان يريد أن يحدث التصادم على ارتفاع 5.0 m من نقطة القذف . بالاضافة الى ذلك يعلم الصبى أن الزمن الذى يحتاجه بين لحظتى القذف هو 3.0 s . بفرض أن الصبى يقذف العلبتين بنفس السرعة ، فما هى السرعة الابتدائية الضرورية لقذف العلبتين ؟

٢٥** – تقف سيدة فى مصعد يتحرك رأسيا الى أعلى بسرعة قدرها 4.0 m/s . فاذا اسقطت السيدة قطعة عملة معدنية من ارتفاع 1.2 m فوق أرضية المصعد ، فما هو الزمن اللازم لقطعة العملة لكى تصدم بالأرضية ؟ وماهى سرعة قطعة العملة بالنسبة الى أرضية المصعد قبل التصادم مباشرة ؟

* مسائل أكثر صعوبة قليلا من المتوسط .

** تحتاج هذه المسائل الى براعة أكبر كثيرا من المسألة المتوسطة .

الفصل الثالث

القوى والحركة الخطية

فى الفصل السابق ناقشنا مفهوم السرعة والتسارع دون التعرض الى مايسبب حركة الاجسام على وجه التخصيص . وقد أجلنا دراسة دور القوى فى احداث الحركة الى هذا الفصل . سندرس الآن كيف تسبب القوى تسارع الاجسام ، وفى أثناء هذه الدراسة سنذكر ونناقش قوانين نيوتن الثلاثة للحركة وسنجد أن هذه القوانين ذات أهمية اساسية فى علم الفيزياء .

٣ - ١ اكتشاف القوانين الفيزيائية

القانون الفيزيائى هو تعبير عن الطريقة التى تتصرف بها المادة وهى قوانين لاسيطرة لنا عليها فقد وجدت منذ الأزل وستوجد الى الابد. والغرض من جميع الابحاث الاساسية فى العلوم الفيزيائية هو اكتشاف هذه القوانين . فالفهم فى العلم يكافىء معرفة قوانين الطبيعة ونتائجها .

وبالرغم من أن الناس يخطئون احيانا فيما يظنون أنه القوانين الفيزيائية ، فان الصيغ غير الصحيحة التى يعتقدون أنها قوانين الطبيعة ليست بالطبع قوانين على الاطلاق . فمثلا أعتقد أرسطو أنه قد اكتشف أحد قوانين الطبيعة عندما قال أن « الاجسام الثقيلة تتسارع الى الأرض اسرع من الاجسام الخفيفة » . وفى الحقيقة أنه لم يكتشف أحد قوانين الفيزياء لأنه لا وجود لمثل هذا القانون على الاطلاق . أما القانون الطبيعى الذى ينطبق على هذا الموقف فقد اكتشفه جاليليو بعد قرون عديدة كما رأينا سابقا .

وحتى القانون الذى اكتشفه جاليليو لتسارع الاجسام ، كما هو معلوم الآن ، أبعد من أن يكون قانونا كاملا وعاما . فنحن جميعا نعلم أن الاجسام الموجودة فى سفن الفضاء تتصرف بطريقة تختلف كثيرا عن اجسام جاليليو الساقطة ، فالأجسام فى سفينة الفضاء لاتبدو لقائد السفينة كأجسام ساقطة على الاطلاق ولكنها تبدو له عديمة الوزن تماما . وبالطبع لم يكن جاليليو يملك الوسيلة لمعرفة ذلك ، وعليه فمن الطبيعى أن يكون القانون الذى اقترحه غير كامل . كذلك فان قياساته لم تكن دقيقة لدرجة كافية ليبين أن نفس الجسم يتسارع بدرجات مختلفة تحت تأثير الجاذبية الأرضية فى اماكن مختلفة على الأرض .

هناك قاعدة عامة فى العلم تنص على أن أيا من قوانين الطبيعة لايمكن أن يكون معروفا تماما بكل ماتحمل الكلمة من معنى . ويبذل العلماء قصارى جهدهم فى صياغة قوانين الطبيعة كما يعرفونها . ومع ذلك فان أى عالم لايتجرأ على أن يقول أن هذا القانون من قوانين الطبيعة أو ذاك ، كما هو مفهوم الآن ، لن يكون عرضه للتعديل كلما زادت معرفتنا أكثر وأكثر بالكون. ولكن يمكننا التأكيد أن جميع قوانين الطبيعة التى سنعرضها ونستخدمها فى هذا الكتاب تقريبا صحيحة فى اساسياتها أو أن حدود صحتها معلومة ، ونحن نعلم ذلك لأن هذه القوانين قد تم تحقيقها عمليا بجميع الطرق الممكنة . ومع ذلك فان هناك دائما فرصة لأن يتبين فى وقت ما أن أحد هذه القوانين ، كما هو مصاغ ومفهوم فى الوقت الحاضر ، لايتفق مع نتائج بعض التجارب العبقرية الجديدة . عندئذ ستتغير صيغة القانون بما يتفق مع التجربة الجديدة ، وكذلك مع النتائج التى نعلمها فعلا فى الوقت الحاضر . لذلك فعند صياغة القانون الفيزيائى يمكن اعتباره صحيحا فى ضوء معرفتنا الحالية فقط .

وستلاحظ عندما تتقدم فى دراستك لعلم الفيزياء أن من النادر جدا أن يتضح أن أحد الافكار المقبولة المتعلقة بالقانون الفيزيائى غير صحيحة . ومع ذلك فمن الشائع تماما أن تجد أن احد الافكار المقبولة يجب تعميمها وتوسيعها وتعديلها كلما توسعت معرفتنا بالكون وسنرى أن الشهرة العظيمة التى يتمتع بها العلماء الذين يقترحون احد القوانين لاتؤكد دائما صحة هذا القانون . وكما سنرى فى دراسة الضوء فان عالما كبيرا مثل نيوتن كانت لديه اخطاء فاحشة جدا حول طريقة تصرف الاجسام الطبيعية . لهذا السبب فإن العالم الحكيم لايقبل القانون الفيزيائى بسبب عظمة وشهرة ناشره فقط ، فإن قانونا يكتشفه عالم شاب « مجهول » من خلال تجارب دقيقة قد يوثق به أكثر من الرأى الفلسفى لعالم « عظيم » .

وفى النهاية يجدر بنا أن نشير الى أن هناك تسلسلا هرميا للقوانين الفيزيائية . والهدف النهائى للعلماء هو اختصار عدد القوانين الفيزيائية اللازمة لوصف الكون الى الحد الادنى . وبالطبع من الممكن استخدام قانون فيزيائى مختلف لكل موقف فيزيائى مختلف ، ولكن مثل هذا الموقف لايطاق لأن من المستحيل تذكر مثل هذا العدد الكبير من القوانين . ومع ذلك فان كثيرا من هذه القوانين المنفصلة يمكن أن تتبع قانونا واحدا عاما يحتويها جميعها . وعلى سبيل المثال فأن القوانين المنفصلة

١ - يتسارع الجسم الذى وزنه 10 lb أثناء السقوط الحر على الأرض بمعدل قدره $32\ Ft/s^2$.

٢ - يتسارع الجسم الذى وزنه 12 lb أثناء السقوط الحر على الأرض بمعدل قدره $32\ ft/s^2$ ، ...الخ .

قد ادمجت فى قانون واحد هو قانون جاليليو الذى يمكن صياغته كمايلى :

تتسارع جميع الاجسام أثناء السقوط الحر على الأرض بمعدل قدره $32\ ft/s^2$ تقريبا .

سنرى فيما بعد أن صيغة جاليليو لهذا القانون الفيزيائى هى فقط جزء من قانون اكثر عمومية قد صاغه نيوتن بعد ذلك بعدد من السنين . وتفضل صيغة قانون الطبيعة الذى يحتوى على مادة الكثير من القوانين الاصغر على أى صيغة للقوانين الاصغر المنفصلة .

٣ - ٢ قانون نيوتن الأول للحركة

كان اسحق نيوتن (١٦٤٢ - ١٧٢٧) واحدا من اهم الفيزيائيين فى جميع العصور . فعندما كان فى العشرينيات من عمره اخترع فرع علم الرياضيات المعروف

الآن **بحساب التفاضل والتكامل** واكتشف قانون الجاذبية ووجد أن الضوء الأبيض هو مجموعة مؤتلفة من الالوان ، وسنناقش بعضا من هذه الموضوعات فى فصول لاحقة. وفى هذا الفصل سنناقش القوانين الثلاثة الخاصة بالحركة والتى اكتشفها نيوتن . ونشرها لأول مرة فى عام ١٦٨٧ فى خلاصة وافية ممتازة لاكتشافاته العلمية تحت عنوان « الاساسيات الرياضية للفلسفة الطبيعية »*.

يمكن صياغة **قانون نيوتن الأول للحركة** ، مترجما عن اللاتينية ، كمايلى :

يستمر كل جسم فى حالته من السكون أو الحركة المنتظمة فى خط مستقيم مالم يجبر على تغيير هذه الحالة بواسطة القوى المؤثرة عليه .

ويبدو هذا الجزء معقولا ومتفقا مع خبرتنا اليومية ، فنحن نعلم جيدا أن الاجسام الساكنة تستمر فى حالة السكون حتى تتسبب قوة خارجية ما فى حركته . كلنا يدرك هذه الحقيقة . ولكننا قد نصاب بالرعب كما يحدث أحيانا عندما يدعى شخص ما أنه قد رأى جسما يتحرك بدون قوة ظاهرة تسبب هذه الحركة . ويتقبل الفيزيائيون ، كذلك المنطقيون من الناس ، هذا الجزء من القانون كبديهية مسلم بها . يمكننا صياغة هذا الجزء كمايلى :

قانون نيوتن الأول

يستمر الجسم الساكن فى حالة السكون مالم تؤثر عليه قوة محصلة تختلف عن الصفر .

أما الجزء الثانى من القانون فانه اكثر خبثا ، وهو كمايلى :

يستمر الجسم المتحرك فى حركته فى خط مستقيم بسرعة ثابتة مالم تؤثر عليه قوة محصلة تختلف عن الصفر .

يبدو أن الخبرة العامة تناقض هذا ، فنحن نعلم أن أى شىء لايستمر فى الحركة بدون تغيير الى الابد . فاذا دحرجت كرة على الأرض فانها سرعان ماتتوقف . كذلك فان الجسم المعدنى الذى ينزلق على منضدة ملساء يتباطأ تدريجيا ليتوقف فى نهاية الأمر . وهناك حالات مشابهة كثيرة أخرى .

ومع ذلك فان كل من الامثلة المذكورة ليس اختبارا صحيحا لقانون نيوتن فهناك قوة تؤثر على كل من هذه الاجسام تحاول وقف حركته الافقية وهى قوة الاحتكاك .

* «Principia mathematica phiosophiae naturalis»

ونحن جميعا نعلم أنه كلما زادت الاحتياطات التى نتخذها للتخلص من هذه القوة كلما قلت سرعة وصول الجسم الى حالة السكون . وقد عمم نيوتن هذه الملاحظة على الحالة التى تختفى فيها قوى الاحتكاك واستنتج أنه اذا كانت هذه الحالة ممكنة فان الجسم المتحرك لن يتوقف أبدا . وبالرغم من أنه لم يمكن حتى الآن الوصول الى مثال واحد للحركة بسرعة ثابتة فان خبرتنا تؤدى بنا الى الاعتقاد بأن حدس نيوتن المصاغ كقانون طبيعى صحيح .

وهنا من الضرورى أن نذكر أن الجسم المتحرك بدون تأثير أية قوة محصلة عليه يقال عنه عادة بأنه فى **حال توازن** . وقد يبدو للمبتدئين أن هذا استخدام غير صحيح للكلمة . ومع هذا فاذا عرفنا الجسم بأنه فى حالة توازن اذا كان مجموع جميع القوى الموجهة المؤثرة عليه يساوى صفرا فان الاستخدام السابق للكلمة سيكون صحيحا . وربما تقبلت انت هذه الحقيقة بطريقة مختلفة فالموضوع اساسا موضوع تعريفات . ولكن من المفضل أن تقبل التعريف الذى أعطاه الفيزيائيون لمفهوم التوازن (على الاقل عندما تتكلم مع الفيزيائيين) حتى وان كنت تشعر فى قرارة نفسك أن هذا التعريف ليس هو التعريف « الطبيعى » .

٣ — ٣ قانون نيوتن الثالث للحركة

نظرا للتعقيد الكبير لقانون نيوتن الثانى فاننا سوف نناقشه بعد القانون الثالث . ينص **القانون الثالث** ، كما صاغه نيوتن ، على الآتى :*

قانون نيوتن الثالث

لكل فعل دائما رد فعل مساويا فى المقدار ومضاد له فى الاتجاه ، أو أن الافعال المتبادلة بين جسمين كل على الآخر متساوية دائما فى المقدار ومتضادة فى الاتجاه

يمكننا اعادة صياغة هذا القانون بدلالة جسمين والقوى التى يؤثر بها كل منهما على الآخر . يمكننا عندئذ أن نقول مايلى :

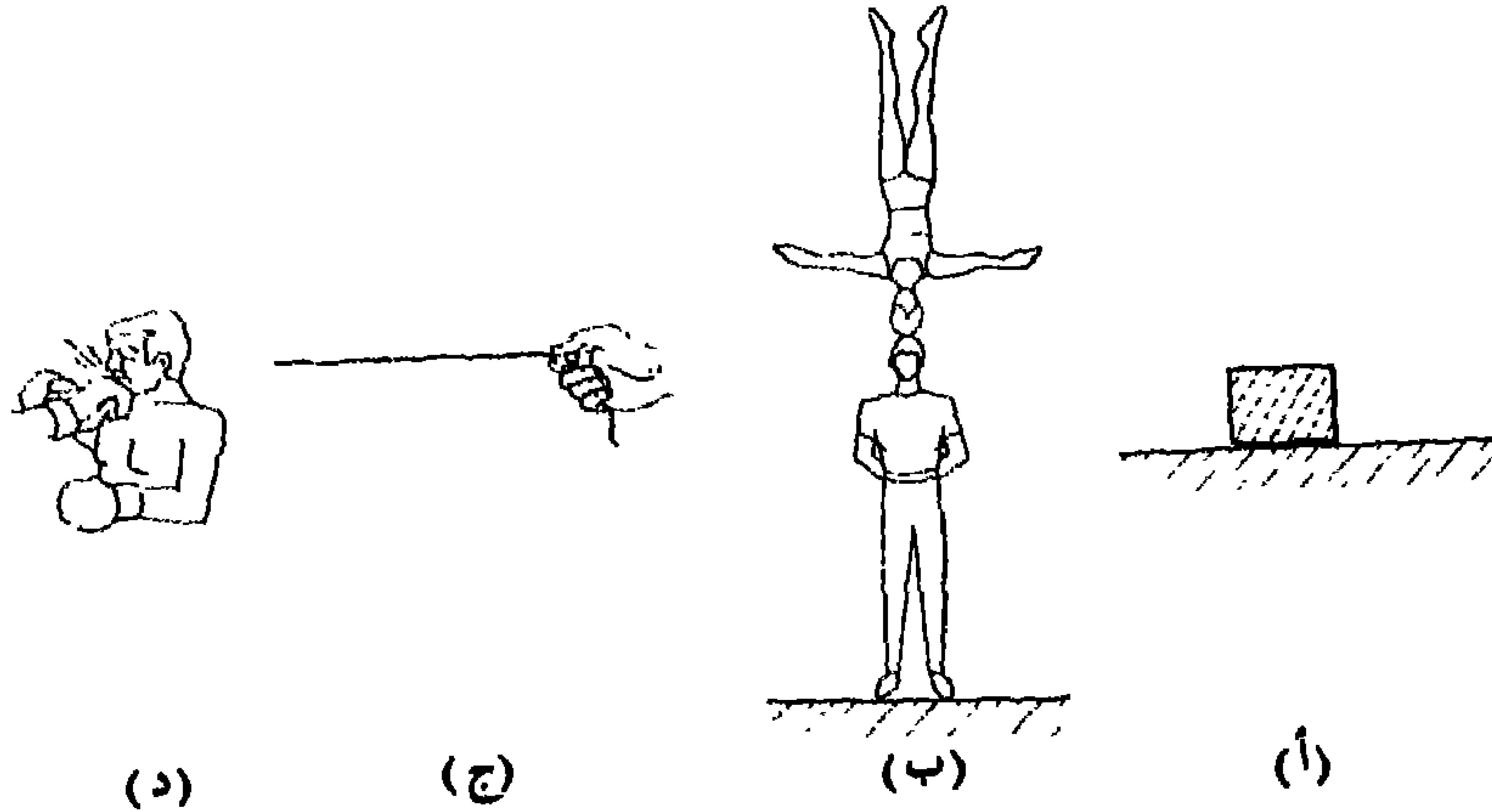
اذا أثر جسم بقوة ما على جسم ثان فان الجسم الثانى يؤثر على الأول بقوة مساوية لها فى المقدار ومضادة فى الاتجاه . وتسمى احدى هاتين القوتين **بقوة الفعل** وتسمى الاخرى **بقوة رد الفعل** .

---

* يمكنك أن تجد هذه الفقرة ، وكذلك كتابات كثير من العلماء العظماء الآخرين من « الكتاب المصدر فى الفيزياء » . تأليف و . ف . ماجى ، مطبعة جامعة هارفارد ، كيمبريدج ، ماساتشوستس ، ١٩٦٣ .
(«Source Book in Physics» by W.F. Magie, Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1963) وأظن أنك سوف تستمتع بقراءة هذا الكتاب الممتاز .

يوضح الشكل ٣ – ١ بعض الامثلة لقانون الثالث ويوضح الجدول التالى قوة الفعل وقوة رد الفعل فى كل حالة :

المثال	القوة الأولى	القوة الثانية
الجزء (أ)	يدفع القالب المنضدة الى أسفل	تدفع المنضدة القالب الى أعلى
الجزء (ب)	تدفع رأس المرأة الرجل الى أسفل	تدفع رأس الرجل المرأة الى أعلى
الجزء (جـ)	تجذب اليد الحبل الى اليمين	يجذب الحبل اليد الى اليسار
الجزء (د)	تؤثر قبضة اليد بقوة على الفك	يؤثر الفك بقوة على قبضة اليد



شكل (٣ – ١)
لاحظ أن قوتى الفعل ورد الفعل تؤثران على جسمين مختلفين .

من الضرورى أن تلاحظ أن قانون نيوتن الثالث يعالج جسمين متميزين . ويؤثر الجسم الأول (*A*) على الثانى (*B*) بقوة الفعل بينما يؤثر الجسم الثانى (*B*) على الأول (*A*) برد فعل معاكس وسوف نستخدم هذا القانون من وقت لآخر لايجاد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على جسم ما بمعلومية القوة التى تؤثر على جسم آخر .

٣ – ٤ قانون نيوتن الثانى للحركة

يعتبر القانونان الأول والثالث صيغتان بسيطتان جدا للسلوك المألوف لنا جميعا وهما يبدوان معقولين تماما حتى للمبتدأين . ومع ذلك فأننا سوف نرى أن القانون الثانى ليس على هذه الدرجة من الوضوح وهذا صحيح لسببين : (١) القانون الثانى هو صيغة رياضية مضبوطة للعلاقات بين كميات فيزيائية مختلفة تمام الاختلاف . (٢) تتطلب الصيغة المضبوطة لهذا القانون التعرف على مفهوم الكتلة ، وبالرغم من أن الكتلة ليست معقدة حقيقة بذاتها فانها أحيانا لاتتميز بوضوح كشيء مختلف عن وزن الجسم يمكن كتابة هذا القانون بالطريقة الآتية :

قانون نيوتن الثانى

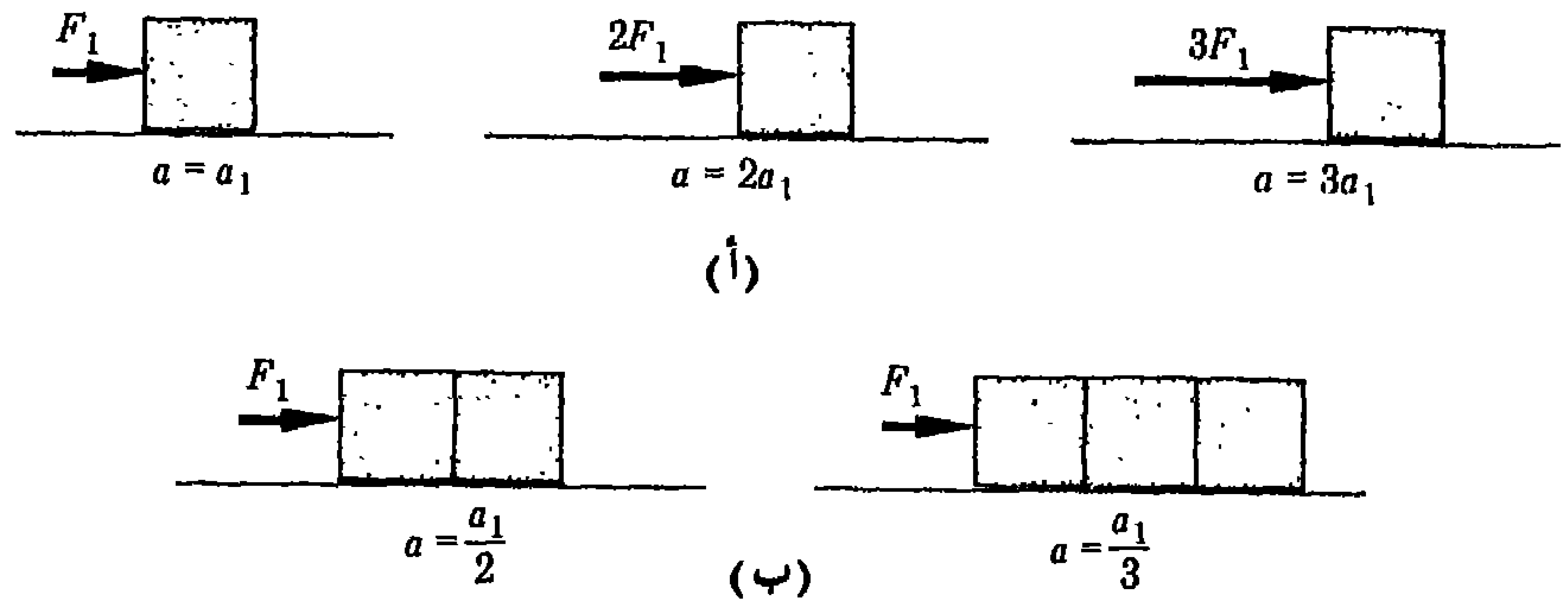
اذا أثرت قوة محصلة تختلف عن الصفر على جسم ما فان هذه القوة تسبب تسارع الجسم فى اتجاه القوة ، ويتناسب مقدار التسارع تناسب طرديا مع مقدار القوة المحصلة وعكسيا مع كمية المادة الموجودة فى الجسم .

من السهل توضيح هذا القانون كيفيا . اذا أراد شخص أن يدفع طفلا فى عربة الاطفال فمن الواضح لكل شخص أنه كلما زادت قوة دفع العربة كلما زاد تسارعها . وكذلك فان الحقيقة الكمية بأن تسارع جسم معين يتناسب تناسبا طرديا مع القوة قد اثبتت مرات عديدة بالتجارب ومن أمثلتها تلك التجربة الموضحة فى شكل (٣ — ٢) . بناء على ذلك يمكننا كتابةالعلاقة التالية :

$$a \propto F$$

حيث تقرأ $\propto$ هكذا « تتناسب مع »

ولكن القوة اللازمة لتسارع الجسم تعتمد أيضا على أمتلاء الجسم . ولكل جسم خاصية مميزة تسمى **القصور الذاتى** . فجميع الاجسام تميل الى الاستمرار فى حالة السكون مالم تؤثر عليها قوة غير متزنة ، بالاضافة الى ذلك تميل الاجسام المتحركة الى الاستمرار فى الحركة . لذلك يقال أن للجسم قصورا ذاتيا ويرتبط القصور الذاتى للجسم بامتلائه . وعلى سبيل المثال يختار مدرب كرة القدم الامريكية اللاعبين الممتلئين جدا للوقوف على الخط لأنه ليس من السهل دفع هؤلاء اللاعبين من موضعهم ، أى أن المدرب يعلم أن القصور الذاتى للاجسام الممتلئة اكبر من القصور الذاتى للاجسام الاقل امتلاء . وعليه فان من الصعب تحريك الاجسام الممتلئة اذا كانت ساكنة اصلا ، كذلك فان من الصعب وقفها اذا كانت فى حالة حركة من قبل . من هذا يتضح أن خاصية الامتلاء أو القصور الذاتى يجب أن تتدخل بطريقة ما فى تحديد التسارع الذى تسببه قوة معينة . ولكى نرى كيف يدخل هذا العامل فى تحديد التسارع يمكننا اجراء تجربة عملية مثل تلك الموضحة فى شكل ٣ — ٢ ب .



شكل (٣ — ٢)
عند اجراء هذه التجربة يجب استخدام مسار هوائى أو جهاز مشابه آخر لتقليل الاحتكاك بحيث يصبح مهملا : (أ) تتناسب F طرديا مع a ، (ب) تتناسب a تناسبا عكسيا مع الكتلة .

نرى من هذه التجربة أن التسارع الذى تسببه قوة معينة يتناسب عكسيا مع امتلاء الجسم الذى يتسارع . فاذا ضوعف امتلاء الجسم مرتين فان التسارع يقل الى النصف ، واذا ضوعف الامتلاء ثلاث مرات فأن التسارع يقل الى ثلث قيمته الاصلية . وعليه يمكننا كتابة العلاقة الآتية :

$$a \propto \frac{1}{m}$$

تعريف

حيث m مقياس لامتلاء الجسم ، وسوف تسمى m **كتلة الجسم** . وتعتبر الكتلة خاصية ذاتية للجسم وهى مقياس للقوة غير المتزنة اللازمة لتسارع الجسم . كذلك فانها تعتبر مقياسا للقصور الذاتى .

لقد وجدنا الآن ان $\mathbf{a} \propto \mathbf{F}$ عندما تكون m ثابته ، ولكن $a \propto 1/m$ عندما تكون $\mathbf{F}$ ثابتة . يمكن توحيد هذين التناسبين فى تناسب واحد :

$$\mathbf{a} \propto \frac{\mathbf{F}}{m}$$

لاحظ أن هذه العلاقة تقول أن $\mathbf{a} \propto \mathbf{F}$ عند تكون m ثابتة . بالمثل فانها تقول أن $a \propto 1/m$ عندما تكون F ثابتة.وهكذا يمكننا القول أن هذه العلاقة تمثل النتائج العلمية المبينة فى شكل ٣ – ٢ تمثيلا صحيحا .

يمكن تمثيل التناسب بمعادلة باستخدام ثابت التناسب . يمكننا اذن كتابة العلاقة الآتية :

التناسب . يمكننا اذن كتابة العلاقة الآتية :

$$\mathbf{a} = \frac{(\text{const})(\mathbf{F})}{m}$$

ولتبسيط هذه المعادلة اتفق العلماء منذ زمن بعيد على قياس F و m بطريقة تمكنهم من جعل الثابت مساويا للوحدة . وبهذا الشرط (وسنرى نتائجه فيما بعد) ، يمكننا أن نكتب :

الصيغة الرياضية لقانون نيوتن الثانى

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad \text{أو} \quad \mathbf{F} = m\mathbf{a} \qquad (٣ - ١)$$

وهذه هى الصيغة لقانون نيوتن الثانى . وعند كتابة هذه الصيغة يلاحظ أن $\mathbf{F}$ هى القوة المحصلة المؤثرة على جسم كتلته m تذكر أيضا أن m مقياس للقصور الذاتى للجسم . وتقيس درجة صعوبة تحريك الجسم اذا كان ساكنا أو وقفة اذا كان متحركا قبل ذلك . كذلك يجب ملاحظة أن اتجاه التسارع $\mathbf{a}$ هو نفس اتجاه القوة $\mathbf{F}$.

وعند هذه النقطة من المحتمل أن تستطيع ربط كتلة الجسم بوزنه . وبالطبع فان هناك علاقة بين الكميتين لأن الاجسام الممتلئة ثقيلة . وبالرغم من أن هناك علاقة بين الكتلة والوزن فانهما ليستا متساويتين.

ومن المهم جدا أن تعرف العلاقة بين الكتلة والوزن . لنحاول الآن ، اكتشاف هذه العلاقة .

لنرجع الى التجربة الموضحة فى شكل ٣ — ٣ وهو يمثل جسما يسقط سقوطا ذاتيا تحت تأثير جذب الأرض له . ونحن نعلم بالطبع أن تسارعه هو تسارع الجاذبية g . بالاضافة الى ذلك فاننا نعلم ماهى القوة غير المتزنة التى تؤثر على الجسم ، وهى جذب الجاذبية الأرضية للجسم وقد سميناها فيما سبق بوزن الجسم . وهكذا فان القوة المحصلة المؤثرة على الجسم الموضح فى شكل ٣ — ٣ هى وزن الجسم W وهذه القوة غير المتزنة تكسب الجسم تسارعا قيمته g . لنعوض الآن عن هذه القيم فى المعادلة (٣ — ١) . سنجد عندئذ أن :

العلاقة بين الكتلة والوزن

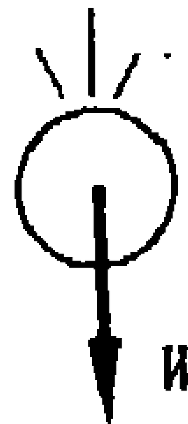
$$W = mg \quad \text{أو} \quad m = \frac{W}{g} \qquad (٣ - ٢)$$

وهذه المعادلة فى غاية الاهمية وهى توضح العلاقة بين كتلة الجسم ووزنه .

يستنتج من ذلك أن الكتلة ثابت اكثر تمييزا للجسم من وزنه . وقد بينت التجارب الدقيقة أن قيمة g تختلف من مكان الى آخر على سطح الأرض وقد وضحنا ذلك فى الفصل السابق . ومع ذلك فقد وجد أن وزن الجسم يختلف أيضا من مكان إلى آخر على سطح الأرض . وقد وجد دائما أن التغير فى قيمتى W و g يتم بحيث تظل النسبة W/g ثابتة دائما . وعليه ، فبالرغم من أن وزن الجسم يتغير ، ويعتمد ذلك على مكان قياسه ، فإن قانون نيوتن الثانى يبين أن كتلة الجسم ثابتة فى كل مكان* .

هذه الحقيقة فى الواقع هى احدى الحقائق المؤكدة فى عصرنا الحديث . فعندما يظهر جسم عديم الوزن لرائد فضاء موجود فى تابع أرضى فإننا نعلم أن كتلته m مازالت كما هى على سطح الأرض دون أى تغيير . وحيث أن هذا صحيح فاننا نرى من المعادلة (٣ — ١) أن القوة اللازمة لتسارع جسم ما فى التابع الأرضى هى نفس القوة اللازمة لتسارعه على الأرض . وبدرجة عالية من الدقة يمكن اعتبار أن كتلة الجسم ثابتة (باستثناء حالات خاصة سنذكرها فيما بعد) وأن التسارع الذى تسببه قوة معينة للجسم لايعتمد على ما اذا كان هذا الجسم على الأرض أو فى أى مكان آخر فى الكون .

شكل (٣ — ٣)
القوة غير المتزنة التى تؤثر على الجسم هى وزنه W ، وتسبب هذه القوة تسارعا مقداره g .



W = الوزن

وحيث أن الكتلة تتناسب تناسبا طرديا مع وزن الجسم على الأرض فان من المعتاد أن ننسب خصائص مميزة معينه للاجسام الى وزنها عندما نود الحديث بدقة عن

* وضح اينشتين سنة ١٩٠٥ لأول مرة أن هذه العبارة ليست صحيحة تماما وسنناقش هذا الموضوع بتفصيل أكثر فيما بعد .

كتلتها . فمثلا اذا أمكن وضع قاطرة سكة حديد فى قمر صناعى يدور حول الأرض فانه سيكون من الصعب أن نسبب تسارع هذه القاطرة بنفس الدرجة كما لو كانت موجودة على الأرض تماما ، لأن المعادلة (٣ - ١) مازالت صحيحة فى هذه الحالة . ومع ذلك فان القاطرة ستبدو عديمة الوزن بالنسبة لشخص موجود فى داخل القمر الصناعى ، لذلك فليس صحيحا أن نقول أنه من السهل تسارع الاجسام الخفيفة ، ويعتمد ذلك على مكان قياس الوزن وعلى الشخص الذى يقوم بعملية الوزن* .

من هذا نجد أن خاصية القاطرة الثابتة على الأرض وفى المدار ايضا هى كتلتها m . من الواضح اذن أن كتلة الجسم هى مقياس أفضل كثيرا للقوى اللازمة لتسارعه اكثر من كون الوزن مقياسا لذلك.وتسمى تلك الخاصية التى تتطلب أن تؤثر قوة معينة على الجسم لكى تسبب تسارعه **بالقصور الذاتى** للجسم . وتعتبر كتلة الجسم مقياسا مباشرا لقصوره الذاتى . **تعريف**

٣ - ٥ الوحدات القياسية للقياس

استخدمنا فى الاجزاء السابقة من هذا الكتاب وحدات قياس مألوفة لنا جميعا . ومع ذلك فمن الضرورى الآن أن نعرف بدقة الكميات الأساسية التى استخدمناها فى اجزاء سابقة .

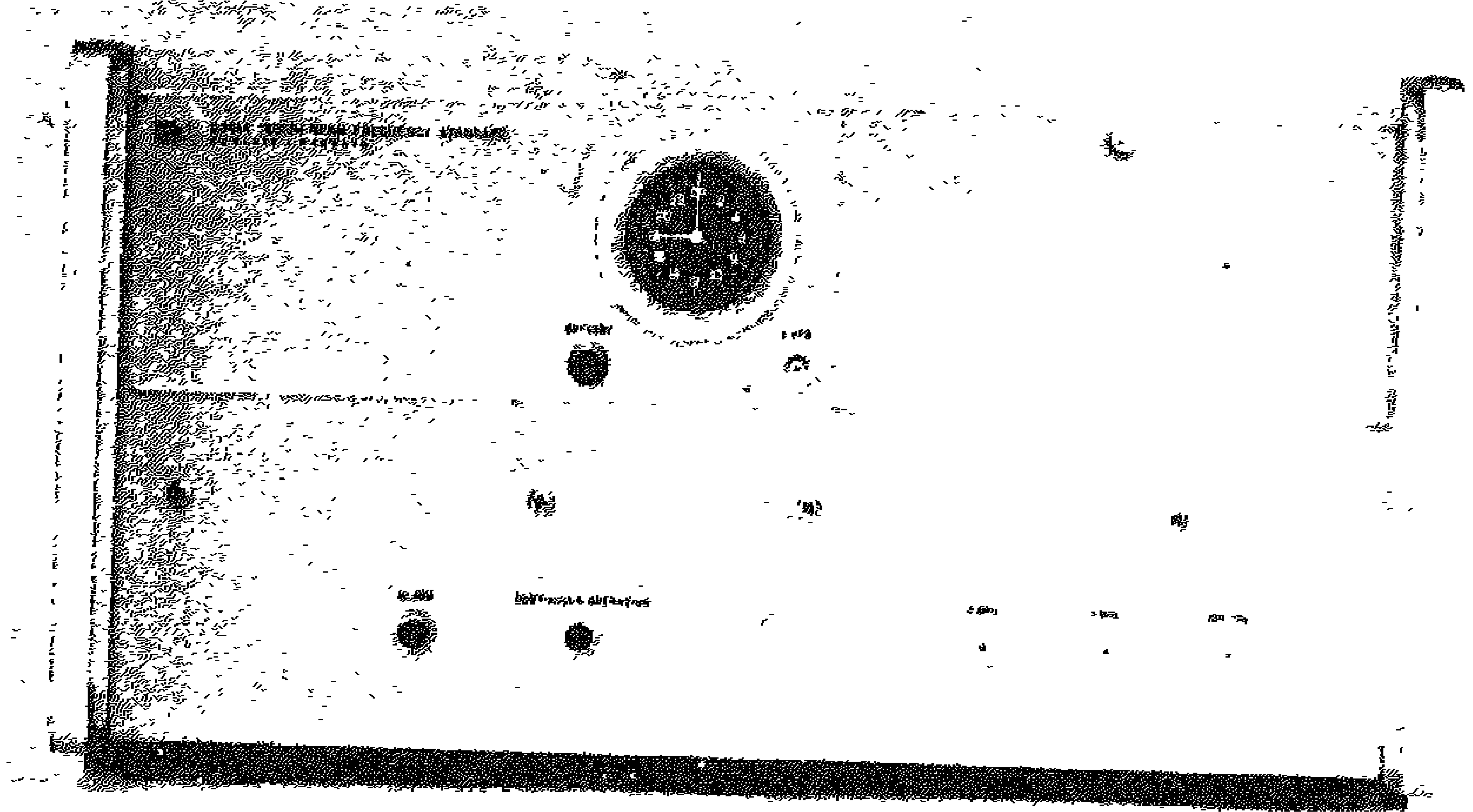
وحدات الطول . بناء على اتفاق عالمى كانت الوحدة المستخدمة لقياس الطول لسنوات كثيرة هى المسافة بين علامتين محفورتين على قضيب مصنوع من سبيكة من البلاتين والايريديوم محفوظا فى المكتب الدولى للأوزان والمقاييس قرب باريس* . وقد عرف المتر بأنه المسافة بين هاتين العلامتين عندما تكون درجة الحرارة 0°C . والسنتيمتر هو جزء من مائة من المتر الامام (العيارى) وكاجراء إحتياطى قورن طول هذا القضيب بالطول الموجى للون معين من الوان الطيف الضوئى بحيث اذا حدث أن دمر هذا القضيب لأى سبب من الاسباب فأن الطول الموجى لهذا الضوء يمكن أن يستخدم كمقياس عيارى بديل . وبالتالى فقد اعيد تعريف المتر الامام بدلالة هذا الطول الموجى للضوء ، وعليه فان القضيب المحفوظ فى باريس هو فقط مقياس عيارى ثانوى وسنناقش هذه النقطة بتفصيل اكثر عندما نبدأ دراسة الضوء .

وتعرف الوحدات البريطانية للطول (القدم والبوصة والياردة) بدلالة المتر الامام . وبالتعريف فان بوصة واحدة تساوى **0.0254 m** وتساوى الياردة **0.9144 m**

---

* لم نحاول أن نشرح لماذا تبدو القاطرة عديمة الوزن بالنسبة الى شخص موجود فى القمر الصناعى ، وستتضح هذه الاسباب عندما نكمل دراسة الحركة الدائرية فى الفصل الثامن .

* International Bureau of Weights and Measures.



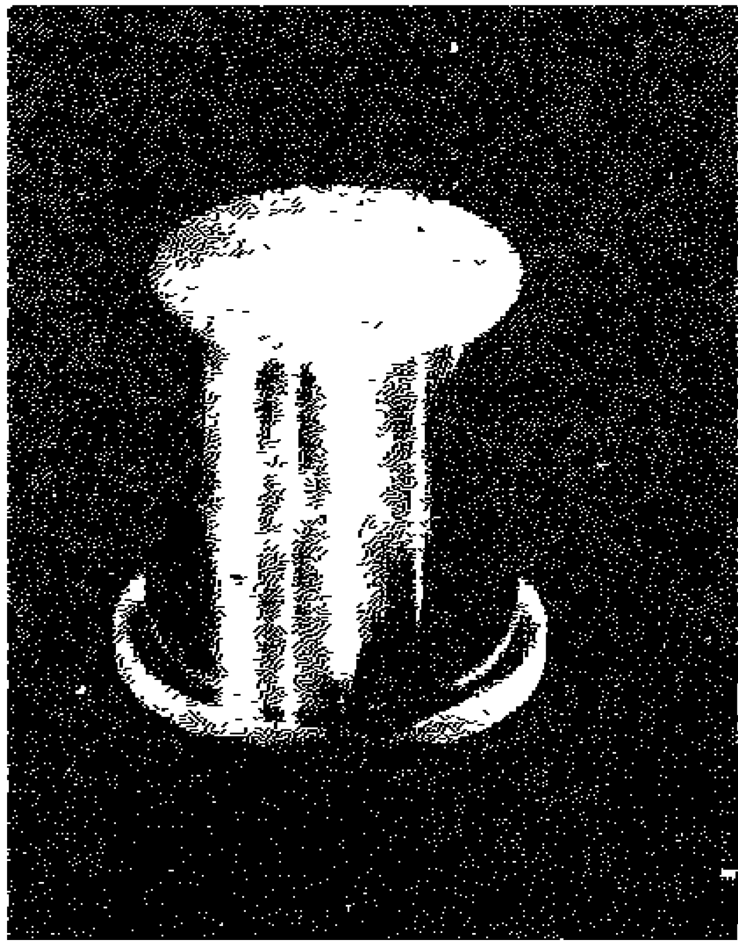
شكل (٣ – ٤)
ساعة سيزيوم قياسية من الانتاج التجارى .

هيلويت – باكارد

وحدات الزمن . عرفت وحدة الزمن الاساسية لسنوات طويلة بدلالة متوسط طول اليوم . ولكن حركة الأرض تتغير قليلا بمرور القرون ، لذلك اتفق على تعريف هذه الوحدة بدلالة متوسط طول اليوم فى عام ١٩٠٠ بالتحديد . ولكى يتاح لنا مقياس اكثر سهولة للزمن اعيد تعريف وحدة الزمن فى عام ١٩٦٧ ، ولتعريف وحدة الزمن الأساسية استخدم تردد اهتزاز ذرات السيزيوم نظرا للسهولة النسبية لقياسه . وتعرف الثانية الآن بأنها تساوى تماما 9,192,631,770 ضعفا قدر زمن اهتزازه واحدة من هذه الاهتزازات . ويمثل الشكل ٣ – ٤ احد النماذج التجارية لساعة ذرية قياسية . وبالطبع فان الدقيقة 60 s ، وتعرف الساعة واليوم والسنة ... الخ كالمعتاد .

وحدات الكتلة . تعرف وحدة الكتلة وتسمى الكيلوجرام بأنها كتلة اسطوانة معينة مصنوعة من سبيكة البلاتين والايريديوم محفوظة بالقرب من باريس ، ويوضح الشكل ٣ – ٥ نسخة من هذه الكتلة الامامية (القياسية) . وحيث ان الوزن يتناسب طرديا مع الكتلة ، من الممكن اذن أن تقارن الاجسام الاخرى بالكتلة الامامية عن طريق الوزن . وهكذا فان الجسم الذى وزنه مرتين قدر وزن الكتلة الامامية تكون كتلة 2 Kg (ومن الطبيعى أن عمليات الوزن يجب أن تتم فى نفس الظروف) . ويعرف الجرام (g) بأنه $^{1}/_{1000}$ Kg .

شكل (٣ – ٥)
اسطوانة البلاتين – ايريديوم ، الموضحة هنا (الطراز البدئى للكيلوجرام رقم 20) هى نسخة من كتلة الكيلوجرام القياسية . حصلنا على هذه الصورة من المكتب القومى للمقاييس العيارية المسئولة عن حفظ هذا المقياس الامامى الثانوى للكتلة



٣ – ٦ الوحدات المشتقة

يسمى نظام الوحدات المبنى على اساس المتر والكيلوجرام والثانية **بالنظام mks** واسمه الرسمى **SI** (اشارة الى **System International**) ، وقد اتفق على استخدام هذا النظام فى المنشورات العلمية . بالاضافة الى ذلك فان النظام المترى المستخدم فى التجارة والصناعة فى بلاد كثيرة يرتبط ارتباطا وثيقا بالنظام SI . وتعتبر الولايات المتحدة آخر اهم البلاد فى استخدام النظام المترى وقد يعزى هذا الى ان وحدات النظام البريطانى مثل القدم – والباوند ... الخ ستهجر قريبا .

من اهم مميزات النظام المترى والنظام SI أن الوحدات فى كل من هذين النظامين ترتبط بقوى الرقم 10 ، وعند تسمية هذه الوحدات تستخدم البادئات الآتية (انظر الملحق ٢ اذا لم تكن الرموز 10^{n} و 10^{-n} مألوفة لك) :

البادئة	الرمز	المعامل
اكسا	E	10^{18}
بيتا	P	10^{15}
تيرا	T	10^{12}
جيجا	G	10^{9}
ميجا	M	10^{6}
كيلو	k	10^{3}
ديسى	d	10^{-1}
سنتى	c	10^{-2}
ملى	m	10^{-3}
ميكرو	μ	10^{-6}
نانو	n	10^{-9}
بيكو	p	10^{-12}
فيمتو	f	10^{-15}
أتو	a	10^{-18}

مثلا 1 Kg يساوى 10^{3} g ، بينما 1 pm (picometer) يساوى 10^{-12} m . وكما ترى فان اضافة البادئة الى اى وحدة تعطينا وحدة جديدة .

وحدة القوة فى النظام SI

ولكننا نحتاج ايضا الى وحدات اخرى بالاضافة الى وحدات الطول والكتلة والزمن ، ومن اهم هذه الوحدات وحدة القوة . تعرف الوحدات الاساسية للقوة بدلالة قانون نيوتن الثانى $F = ma$ ، ويمكن استخدام هذا التعريف بسهولة فى النظام SI ، وسنسمى وحدة القوة فى هذا النظام بالنيوتن (N) .

تعريف

النيوتن هو تلك القوة غير المتزنة التى تعطى جسما كتلته 1 Kg تسارعا قدره $1\ m\ s^{2}$.

وبكتابة هذا التعريف بدلالة قانون نيوتن الثانى $F = ma$ نجد أن :

$$1\ N = (1\ kg)(1\ m/s^2)$$

وعليه فان النيوتن يكافىء $1\ Kg.\ m/s^2$.

وحدة القوة فى النظام CGS

لازال بعض الناس يستخدمون السنتيمتر والجرام والثانية كوحدات أساسية . وتسمى وحدة القوة فى هذا النظام ، **النظام cgs** بالداين (dyn) ، وهو ايضا يعرف بدلالة القانون $F = ma$.

الداين هو تلك القوة غير المتزنة التى تعطى جسما كتلته 1 g تسارعا قدره $1\ cm/s^2$

وكما نرى من القانون $F = ma$

$$1\ dyn = 1\ g \cdot cm/s^2$$

كذلك يمكن بتحويل $1\ Kg.\ m/s^2$ الى جرام . سنتيمتر فى الثانية المربعة اثبات أن :

$$1\ N = 10^5\ dyn$$

وحدة القوة فى النظام البريطانى هى الباوند (lb) وتعرف أيضا بدلالة النيوتن . من التعريف نجد أن :

$$1\ lb = 4.45\ N$$

وفى الوقت الحالى يقل استخدام الباوند بسرعة الا فى الولايات المتحدة.

من الضرورى الآن مناقشة الوحدة البريطانية للكتلة (التى تقابل الكيلوجرام فى النظام SI) ، وتعرف هذه الوحدة بحيث تظل العلاقة $F = ma$ هى العلاقة الاساسية . تعرف وحدة القوة فى النظام البريطانى باسم **سلج** . وتختار بحيث

اذا أثرت قوة غير متزنة مقدارها 1 lb على جسم كتلته 1 slug فانها تسبب له تسارعا مقداره $1\ ft/s^2$.

يمكنك ايضا استخدام التعريف المكافىء التالى :

$$1\ slug = 14.6\ kg$$

وبالطبع ، حيث أن $W = mg$ فان 1 slug يزن 32.2 lb فى مكان تسارع الجاذبية فيه $g = 32.2\ ft/s^2$.

وقد يتساءل البعض لماذا لم نهتم سابقا بالوحدة البريطانية للكتلة وهى سلج ، ولكن سبب ذلك فى غاية البساطة . فالذين يستخدمون النظام البريطانى للوحدات يكتبون قانون نيوتن عادة على الصورة :

$$F = \frac{W}{g} a$$

حيث استبدلت m بقيمتها من المعادلة (٣ — ٢) ، أى بالمقدار W/g . وحيث أن التغير الصغير فى وزن الجسم من مكان الى مكان على الأرض ليس هاما فى التطبيقات الهندسية فان المهندس يستخدم وزن الجسم كما هو مقاس ، حتى بالرغم من أن هذا الوزن لايكون عادة هو الوزن المضبوط ، أى وزن الجسم المقاس فى نفس المكان على الأرض الذى قيس فيه تسارع الجاذبية g . وبهذه الطريقة يمكنهم تحاشى استخدام مصطلح الكتلة ووحدتها وهى سلج .

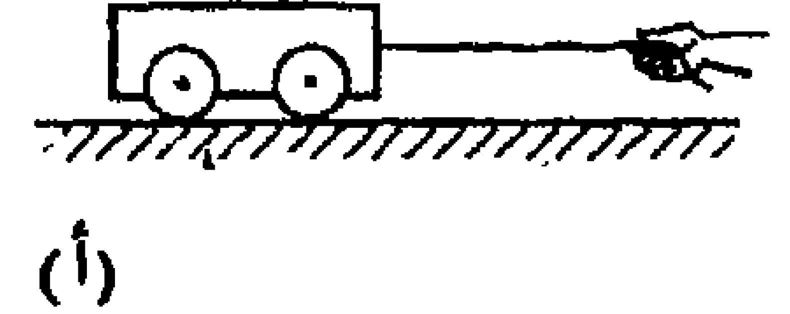
انظمة الوحدات

لتلخيص هذه المناقشة عن الوحدات المشتقة يمكننا ان نلاحظ أن هناك ثلاث مجموعات اساسية للوحدات . (هناك ايضا انظمة أخرى للوحدات ولكنها تستخدم نادرا ، ولذلك فلن نناقشها فى هذا الكتاب) ويمكن تلخيص هذه الانظمة بالاستعانة بقانون نيوتن الثانى كمايلى :

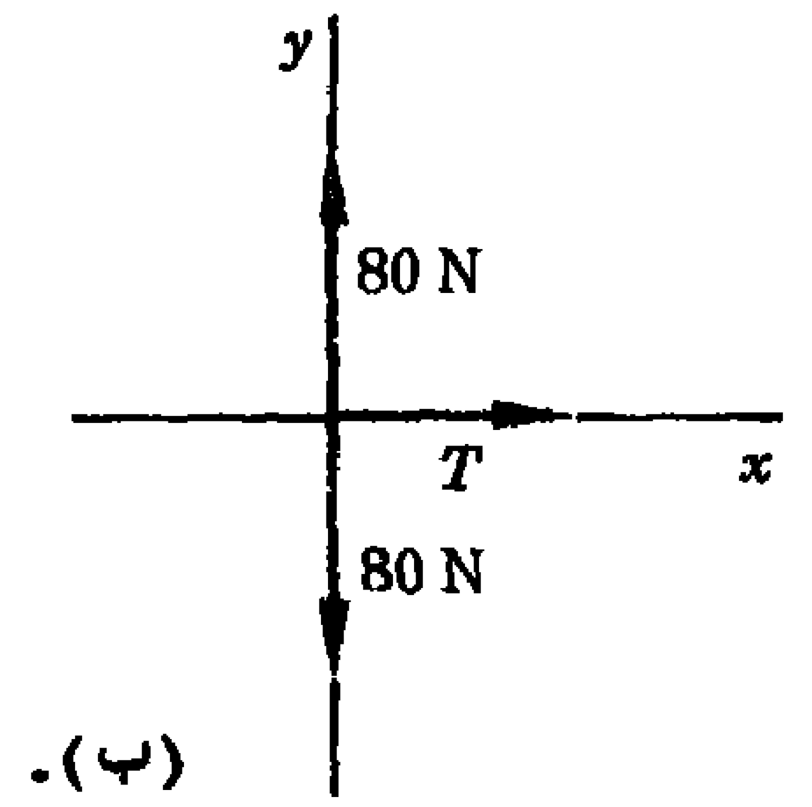
$$F \quad = \quad m \quad \times \quad a$$

نظام الوحدات	وحدة القوة	وحدة الكتلة	وحدة التسارع
SI	نيوتن	كيلوجرام	m/s^2
cgs	داين	جرام	cm/s^2
النظام البريطانى	باوند	سلج	ft/s^2

من الضرورى عند استخدام القانون $F = ma$ أن نراعى دائما استخدام نظام واحد للوحدات فى وقت واحد . فمثلا اذا كانت القوة مقدرة بالباوند فان الكتلة يجب أن تكون مقدرة بالسلج ويكون التسارع مقدرا بالقدم فى الثانية فى الثانية وليس بالميل فى الثانية فى الثانية ولايجب استخدام وحدات مختلطة فى هذه العلاقة .



(أ)



(ب).

شكل (٣ - ٦)

رسم بيان الجسم الحر الذى يوضح القوى المؤثرة على العربة هو الجزء (ب) من الرسم .

وقبل أن نترك هذا الجزء من المستحسن أن نوضح الحقائق التالية،ويراعى أننا قد استخدمنا القيم التقريبية التسارع الجاذبية g :

١ - تزن الكتلة 1-kg على الأرض 9.8 N .

٢ - تزن الكتلة 1-g على الأرض 980 dyn .

٣ - تزن الكتلة 1-slug على الأرض 32.2 lb .

٤ - تزن الكتلة 1-kg على الأرض 2.21 lb .

٥ - يزن الحرف المقطوع من هذه الصفحة حوالى 1 dyn .

٦ - 1 N يساوى 10^5 dyn بالضبط .

٣ - ٧ استخدام قانون نيوتن الثانى

مثال توضيحى ٣ - ١ : سنرى فى هذا الجزء كيف يستخدم قانون نيوتن الثانى فى المواقف العملية . لندرس الموقف الموضح فى شكل ٣ - ٦ . ماهو الشد فى الحبل الذى يجذب العربة فى شكل ٣ - ٦ إذا كان التسارع المطلوب للعربة هو 0.5 m/s^2 ؟ وزن العربة 80 N .

طريقة الحل : لحل هذه المسألة يجب أولا أن نرسم رسم بيان الجسم الحر الذى يوضح القوى المؤثرة على العربة ، وقد تم هذا فى شكل ٣ - ٦ . لاحظ أن هناك ثلاث قوى مؤثرة على العربة وهى جذب الجاذبية الأرضية الى أسفل ودفع الأرضية الى أعلى والشد فى الحبل الى اليمين . وحيث أن العربة لايمكن أن تسقط خلال الأرضية أو ترتفع الى أعلى فى الهواء فان مجموع القوى الرأسية لابد أن يساوى صفرا ، أى أنها تتلاشى . وعليه فان القوة غير المتزنة (أو المحصلة) المؤثرة على العربة هى T . بالاضافة الى ذلك فان التسارع سيكون فى اتجاه T .

لكتابة قانون نيوتن الثانى ، $F = ma$ ، لابد من معرفة كتلة العربة . ولكننا نعلم من المعطيات أن وزن العربة 80 N وعليه فان كتلة العربة يمكن حسابها من العلاقة $m = W/g$ اذن :

$$m = \frac{80 \text{ N}}{9.8 \text{ m/s}^2} = 8.2 \text{ kg}$$

باستخدام هذه القيمة سنجد من العلاقة :

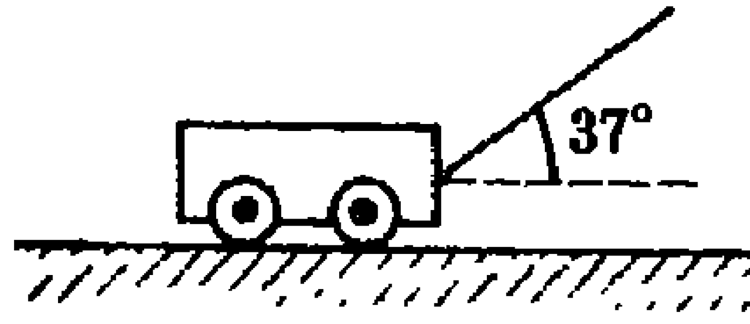
$$F = ma$$

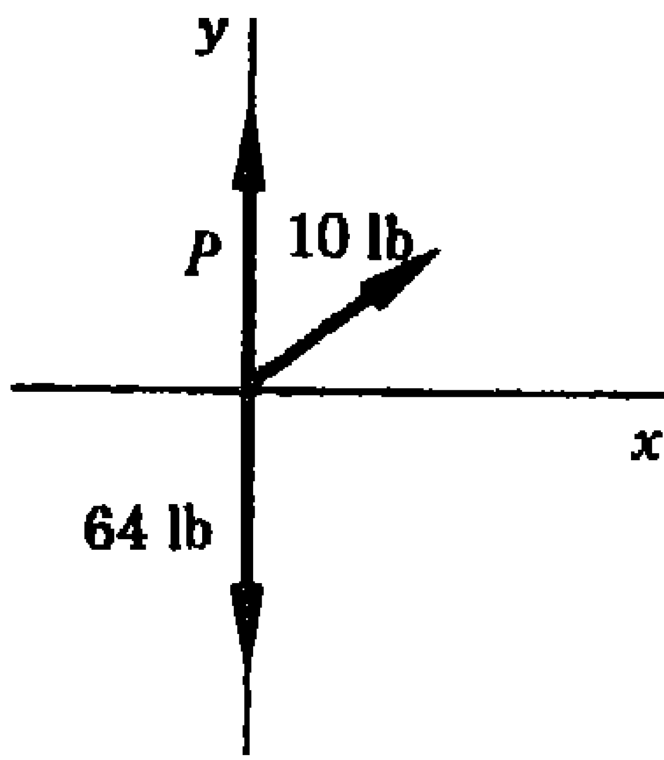
أن :

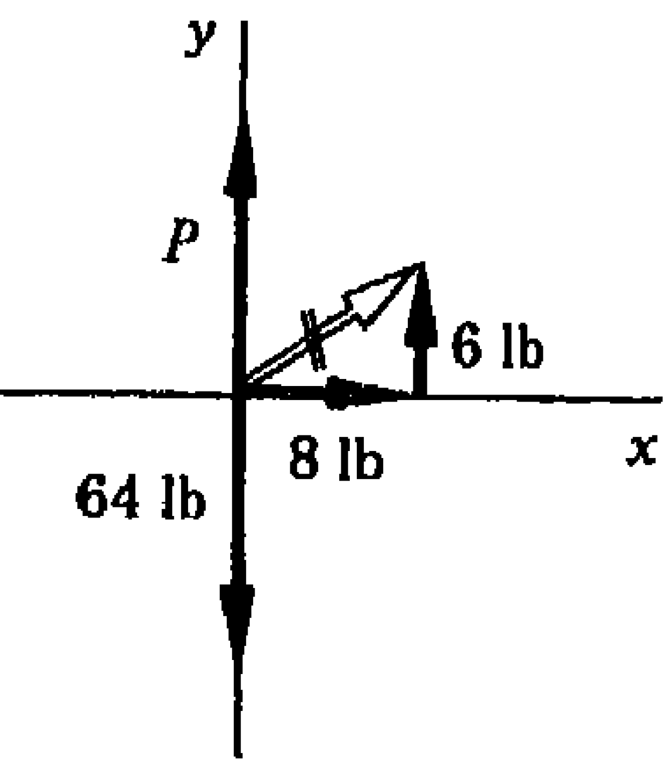
$$T = (8.2 \text{ kg})(0.50 \text{ m/s}^2) = 4.1 \text{ N}$$

سندرس الآن بعض الامثلة الاخرى لكى نوضح النقاط المختلفة المتعلقة باستخدام قانون نيوتن الثانى .

مثال توضيحى ٣ - ٢ : يجذب طفل عربة وزنها 64 lb بقوة قدرها 10.0 lb كما هو موضح فى شكل ٣ - ٧ . (١) بأى معدل تتسارع العربة ؟ (٢) بأى قوة تدفع الأرض هذه العربة الى أعلى ؟







شكل (٣ - ٧)
يساهم جذب الحبل للعربة P فى الاتزان مع وزن العربة وكذلك اعطاء العربة تسارعا الى اليمين .

طريقة الحل : كما فى المثال السابق نرسم رسم بيان الجسم الحر كما فى الجزء (ب) من الشكل . P هو دفع الأرض على العربة الى أعلى . لاحظ الآن أن لجذب الحبل مركبتين فى الاتجاهين الأفقى والرأسى.بعد تحليل هذه القوة الى مركبتين فى الاتجاهين x و y فإن رسم بيان القوى سيكون كما فى الجزء (جـ) . وحيث أن العربة مستقرة على الأرض فان مجموع القوى الرأسية يجب أن يكون صفرا . وهكذا :

$$P + 6.0 - 64 = 0$$

أو

$$P = 58 \text{ lb}$$

وهى اجابة الجزء ٢ من المسألة .

سيكون اتجاه تسارع العربة هو نفس اتجاه القوة غير المتزنة F وهو الاتجاه الافقى . بناء على ذلك :

$$F = ma$$

$$8.0 \text{ lb} = \left(\frac{64 \text{ lb}}{32 \text{ ft/s}^2}\right)(a)$$

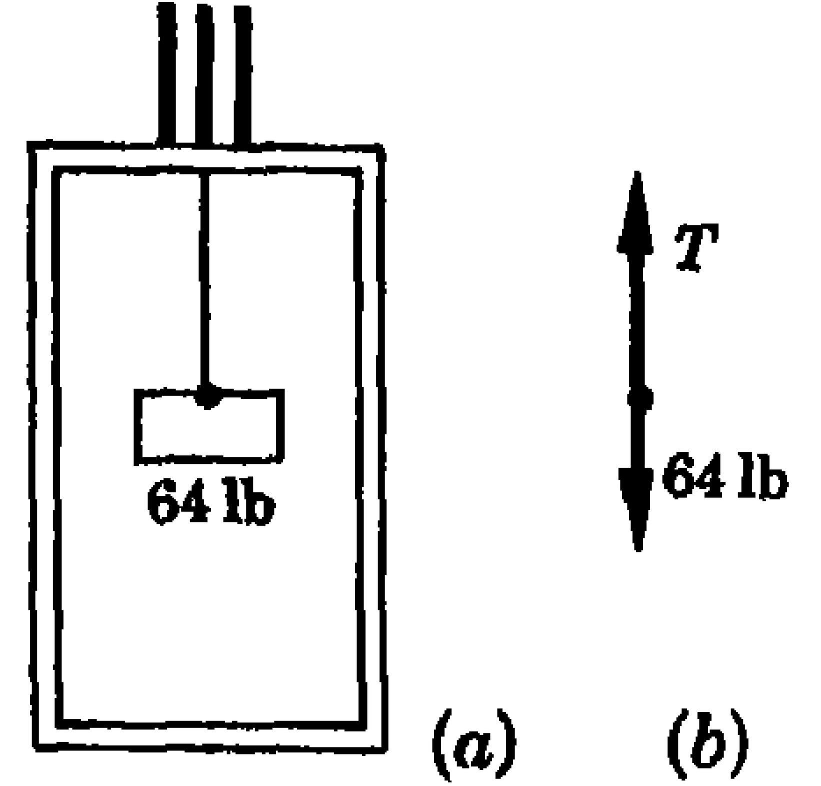
أو

$$a \approx 4.0 \text{ ft/s}^2$$

لاحظ أننا قد استبدلنا m بالمقدار W/g .

مثال توضيحى ٣ - ٣ : علق جسم وزنه 64 lb فى حبل متدل من سقف مصعد (شكل ٣ - ٨أ) ماهو الشد فى الحبل اذا كان متسارعا بمعدل (أ) 12 ft/s^2 الى أعلى ، (ب) 12 ft/s^2 الى أسفل ، (جـ) 32 ft/s^2 الى أسفل ؟

طريقة الحل : يوضح الشكل ٣ – ٨ أ رسم بيان الجسم الحر حيث T هو الشد فى الحبل أى جذب الحبل للجسم الى أعلي . فى الامثلة السابقة لم يكن هناك غموض يذكر فى الاتجاهات . ولكن هذه المسألة معقدة قليلا ، لذلك فيجب علينا الآن اتباع خطة منهجية للحل ومن المعقول أن نختار اتجاها معينا كاتجاه موجب واعتبار القوى والتسارعات فى هذا الاتجاه موجبا ، أما القوى والتسارعات المتجهة فى عكس هذا الاتجاه فتعتبر سالبة .



شكل (٣ – ٨)
عندما يتسارع المصعد الى أعلي يكون T اكبر من 64 lb ، فى أى حالة يظهر الجسم كما لو كان عديم الوزن ؟

أ – باعتبار الاتجاه الرأسى الى أعلي اتجاها موجبا ، نجد أن :

$$F = ma$$
$$T - 64 = (\tfrac{64}{32})(12)$$

اثبت باستعمال الوحدات المناسبة فى هذه المعادلات أن :

$$T = 88 \text{ lb}$$

(ب) باعتبار الاتجاه الرأسى الى أعلي اتجاها موجبا ، نجد أن :

$$T - 64 \text{ lb} = \left(\frac{64 \text{ lb}}{32 \text{ ft/s}^2}\right)(-12 \text{ ft/s}^2)$$
$$T = 40 \text{ lb}$$

لاحظ الاشارة السالبة للتسارع ، وهى ضرورية هنا لأن التسارع متجه إلى أسفل وأننا قد اخذنا الاتجاه إلى أعلى كاتجاه موجب .

(جـ) باعتبار الاتجاه الرأسى الى أسفل اتجاه موجبا ، نجد أن :

$$64 - T = (\tfrac{64}{32})(32)$$
$$T = 0$$

لاحظ أن اختيار الاتجاه الى أعلى أو الى اسفل كاتجاه موجب مسألة شخصية بحتة إذ يمكن الحصول على نفس النتيجة بأى من الطريقتين . لنتحقق الآن من أن نتائجنا معقولة .

فى الجزء أ كان تسارع الثقل الى أعلى ، وعليه فان القوة غير المتزنة متجهة الى أعلى وكانت الجاذبية الأرضية تجذب الجسم الى أسفل بقوة قدرها 64 lb بينما كان الحبل يشد الجسم الى اسفل بقوة قدرها 88 lb . بناء على ذلك كانت القوة غير المتزنة 24 lb الى أعلى ، كما يجب أن تكون .

فى الجزء ب يتحتم أن تكون القوة غير المتزنة متجهة الى اسفل لان التسارع يتجه إلى أسفل . يتضح اذن من اجابتنا أن جذب الجاذبية ومقداره 24 lb إلى أسفل أقوى من جذب الحبل الى أعلى .

قد تبدو اجابة الجزء جـ غريبة قليلا الى أن ندرك أن التسارع المطلوب هو مجرد g ، ويمكن الحصول على هذا التسارع فقط اثناء السقوط الحر ، وعليه فأن الشد فى الحبل لابد أن يكون صفرا .

يجدر بنا أن نلاحظ هنا أن الشخص الذى يحمل شيئا ما فى مصعد هابط كما فى الجزء جـ سيلاحظ أن الجسم المعنى عديم الوزن* . وكما رأينا فإن الجسم يسقط سقوطا حرا وعليه فإن الشد فى الحبل يساوى صفرا وليست هناك حاجة لأية قوة تحمله . واذا كان الجسم معلقا فى ميزان زنبركى أو موضوعا على ميزان فأن الميزان سيقرأ صفرا . ومن الواضح أن الجسم يبدو كما لو كان عديم الوزن . مع الواضح اذن أن انعدام الوزن الظاهرى للاجسام الموجودة فى الاقمار الصناعية وسفن الفضاء التى تهبط فى الفضاء تحت تأثير الجاذبية يشبه تماما هذا المثال . وكما سنرى فى الفصل الثامن تكافىء جميع هذه الحالات مصعدا يسقط سقوطا حرا ، لذلك فان الاجسام الساقطة سقوطا حرا (سفينة الفضاء وكل شىء داخلها) لابد أن تظهر عديمة الوزن لشخص يسقط أيضا سقوطا حرا .

مثال توضيحى ٣ – ٤ : كانت سيارة كتلتها 1500 kg تتحرك بسرعة قدرها 60 km/h (حوالى 37 mi/h) عندما ضغط السائق على الفرامل فتزحلقت السيارة الى أن وصلت الى حالة السكون . فاذا كانت الاطارات المتزحلقة تتعرض لقوة احتكاك قدرها سبعة اعشار وزن السيارة ، فما هى المسافة التى تقطعها السيارة قبل الوقوف ؟

طريقة الحل : تمثل هذه المسألة اتحادا نموذجيا للمسألة $F = ma$ ومسألة حركة . يمكننا استخدام العلاقة $F = ma$ لايجاد a ، ثم يمكن استخدام معادلات الحركة الخمس لايجاد مسافة التوقف .

علمنا ان كتلة السيارة 1500 kg وعليه فان وزن السيارة هو :

$$\text{الوزن} = mg = (1500\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 14{,}700\ \text{N}$$

كذلك نعلم من المعطيات أن قوة الوقف هى :

$$(0.70)(\text{weight}) = 10{,}290\ \text{N}$$

وهذه هى القوة غير المتزنة المؤثرة على السيارة . بالتعويض عن هذه القوة فى العلاقة $F = ma$ واعتبارها سالبة لأنها فى عكس اتجاه الحركة سنجد أن :

$$-10{,}290\ \text{N} = (1500\ \text{kg})a$$

ومنه :

$$a = -6.9\ \text{m/s}^2$$

وهذا تقاصر لذلك فانه سالب .

تستطيع الآن حل مسألة السيارة المتزحلقة . المعطيات هنا هى :

* ومع ذلك فان وزن الجسم ، أى جذب الأرض له ، ليس صفرا . وعليه فان $W = mg$ لاتعنى تغيرا فى الوزن .

$$v_0 = 60 \text{ km/h} = 16.7 \text{ m/s} \qquad v_f = 0$$
$$a = -6.9 \text{ m/s}^2 \qquad s = ?$$

ويمكننا استخدام العلاقة $v_f^2 - v_0^2 = 2as$ لنجد أن $s = 20.2$ m. .

من الضرورى ملاحظة أن قوة الوقف التى استخدمناها قريبة من القيمة العظمى الممكنة . نستنتج من هذا اذن أن السيارة المتحركة بسرعة قدرها حوالى 60 km/h (37 mi/h) تحتاج مسافة قدرها حوالى 20 m لكى تقف . هل تستطيع أن تثبت أن مسافة الوقف تتناسب طرديا مع مربع السرعة الابتدائية للسيارة ؟

مثال توضيحى ٣ – ٥ : ربطت الكتلتان الموضحتان فى شكل (٣ – ٩) فى طرف حبل عديم الوزن ثم علق الحبل على بكره لااحتكاكية عديمة الوزن . أوجد تسارع الكتلتين (يسمى هذا الجهاز آلة «اتوود») .

طريقة الحل . من الواضح أن الكتلة 10 kg سوف تسقط وأن الكتلة 5 kg سوف ترتفع . ولاتقوم البكرة اللااحتكاكية بأى عمل سوى أنها تحمل الحبل . لنرمز الى الشد فى الحبل بالرمز T ، ويلاحظ أنه ثابت فى جميع اجزاء الحبل .

لحل مثل هذه المسألة التى تحتوى على جسمين أو اكثر يجب كتابة المعادلة $F = ma$ لكل جسم على حدة . اولا يجب اختيار الاتجاه الموجب للحركة . نعلم فى هذه الحالة أن البكرة ستدور فى اتجاه دوران عقارب الساعة ، لذلك فمن المعقول أن نعتبر حركة الاجسام موجبة عندما تتحرك فى هذا الاتجاه .

الخطوة الثانية هى رسم بيان الجسم الحر لكل من الكتلتين 10 kg و 5 kg كما هو موضح فى الجزئين ب و جـ من الشكل . لاحظ أن وزن الجسم الذى كتلته 10 kg هو* 10 (9.8) N. بتطبيق العلاقة $F = ma$ على كل من الجسمين نحصل على :

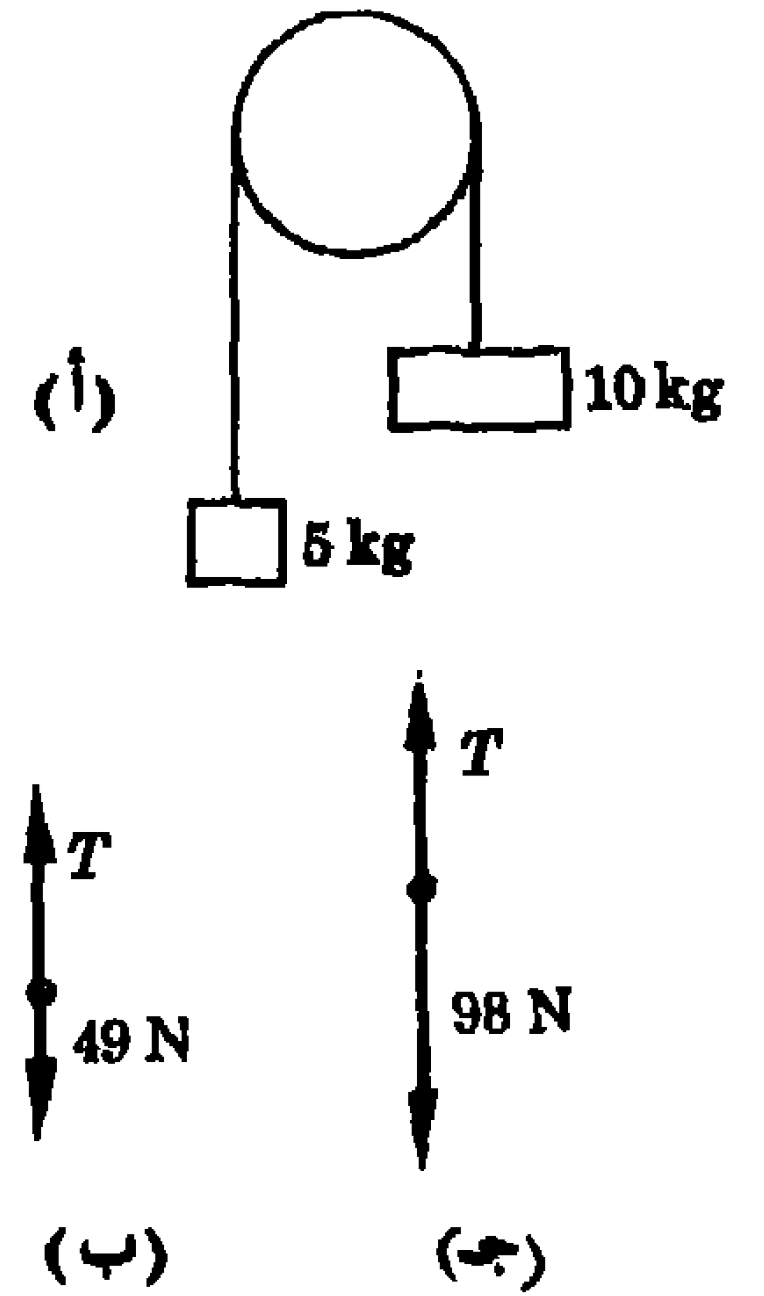
$$98 - T = 10a$$
و
$$T - 49 = 5a$$

لاحظ أن القوتين المتجهتين فى نفس اتجاه الحركة قد اعتبرتا موجبتين .

بجمع المعادلتين السابقتين نجد أن :

$$49 \text{ N} = (15 \text{ kg})(a)$$
أو
$$a = 3.3 \text{ m/s}^2$$

حيث استخدمنا حقيقة أن النيوتن يساوى 1 kg. m/s^2. بالتعويض عن قيمة a فى أى من المعادلتين نجد أن :



شكل (٣ – ٩)
حيث أن الكتلة 10 kg سوف تسقط عند دوران البكرة فى اتجاه دوران عقارب الساعة فان الشد فى الحبل يجب أن يكون أقل من وزن الجسم الذى كتلته 10 kg وأكبر فى نفس الوقت من وزن الجسم الذى كتلته 5 kg .

---

* لأن $W = mg = (10 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 98 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 98 \text{ N}$

$$T = 65 \text{ N}$$

للتحقق من هذه الاجابة يلاحظ أن الشد فى الحبل اكبر من وزن الجسم الخفيف ولذلك فانه يرتفع بالاضافة الى ذلك يلاحظ أن الشد أصغر من وزن الجسم الثقيل ، لذلك فهو يسقط الى أسفل .

مثال توضيحى ٣ – ٦ : يمثل الشكل ٣ – ١٠ جسمين مربوطين فى طرفى خيط بحيث يتعلق احد الجسمين عبر بكرة لااحتكاكية بينما يستقر الآخر على منضدة . فاذا علمت أن قوة الاحتكاك التى تعوق حركة الجسم الموضوع على المنضدة تساوى 0.098 N ، اوجد تسارع الجسمين .

طريقة الحل : عندما تعطى مثل هذه المسألة الى الطلاب فأنهم يقررون أن الجسمين لن يتحركا لأن الجسم الذى كتلته 200 g اخف كثيرا من الجسم الذى كتلته 400 g ، ولكن هذا غير صحيح . ويفسر ذلك بأن وزن الجسم الذى كتلته 400 g متجها الى أسفل ، وهذه القوة تتزن مع دفع المنضدة الى أعلى . أما القوة الوحيدة التى تجذب الجسم الى الخلف فهى قوة الاحتكاك كما هو واضح من رسم بيان الجسم الحر الموضح فى الجزء ب من الشكل .

بعزل كل جسم بالترتيب وكتابة العلاقة $F = ma$ لكل منهما سنجد بعد تحويل الوحدات الى النظام SI أن (انظر شكل ٣ – ١٠ب، جـ) :

$$T - 0.098 = 0.40a$$

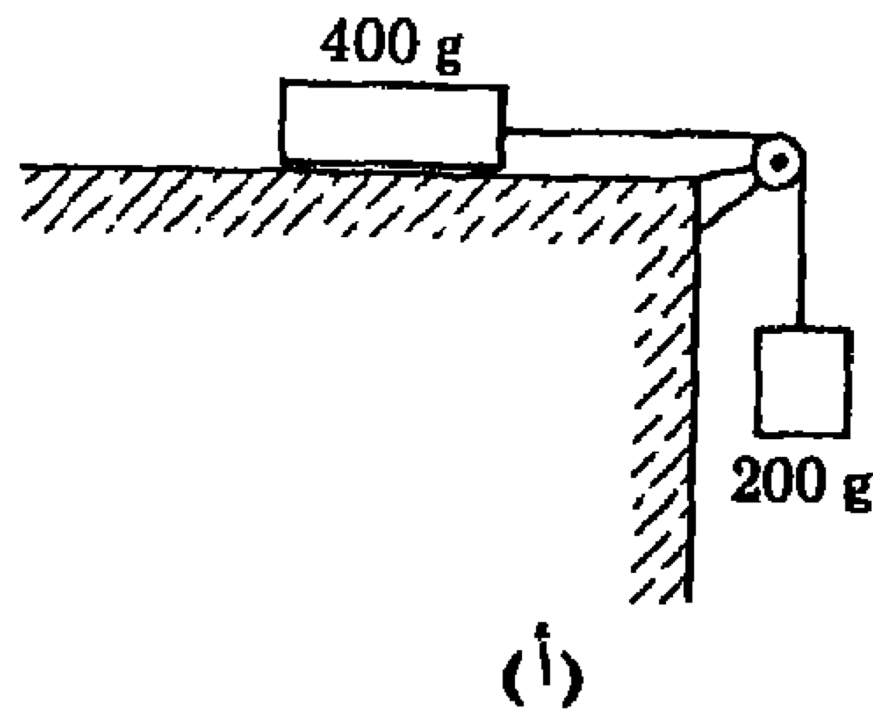
و

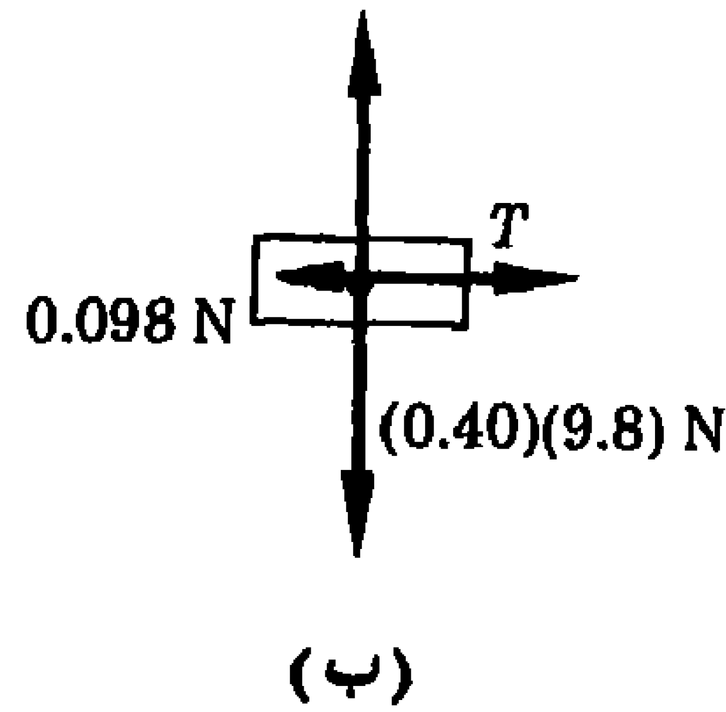
$$(0.20)(9.8) - T = 0.20a$$

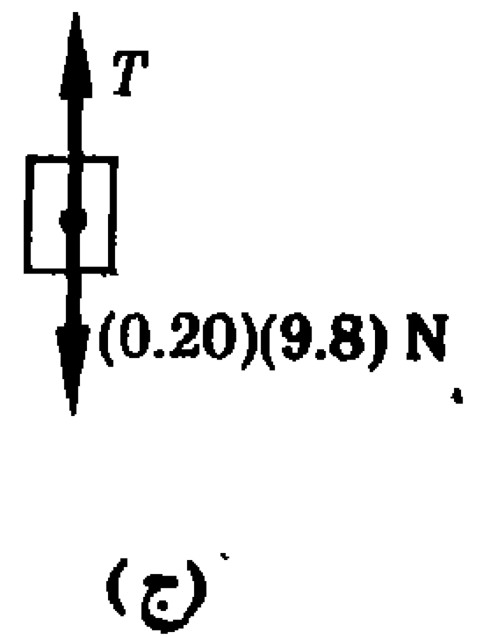
حيث تقدر القوى بالنيوتن والكتل بالكيلوجرام . عند كتابة هاتين المعادلتين اعتبرنا أن اتجاه الحركة التى تحدث عند سقوط الجسم الذى كتلته 200 g الى اسفل هو الاتجاه الموجب،لاحظ أيضا أن $W = mg$ لذلك فان وزن الجسم الذى كتلته 0.20 g هو (0.20) (9.8) N .

بجمع هاتين المعادلتين وحل المعادلة الناتجة بالنسبة الى a سنحصل على :

شكل (٣ – ١٠)
بالرغم من أن قوة الاحتكاك وقدرها 0.098 N تعوق حركة الجسم الذى كتلته 400 g فأن وزن الجسم الذى كتلته 200 g كافيا ليسبب حركة الجسمين . أما وزن الجسم الذى كتلته 400 g فأنه يتزن مع دفع المنضدة .







$$a = 3.1 \text{ m/s}^2$$

باستخدام حقيقة أن النيوتن هو 1 kg. m/s^2 يمكنك اثبات أن رحدات a هى فعلا كما هو مذكور .

بالتعوييض فى أى من المعادلتين سنجد أن :

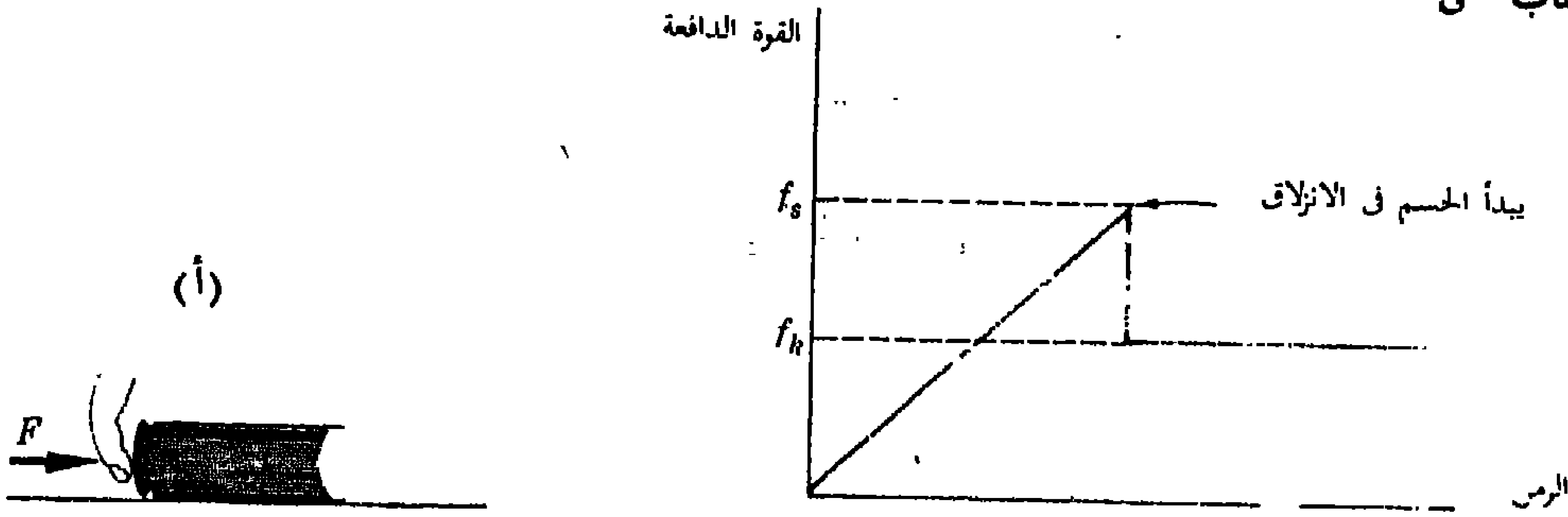
$$T = 1.34 \text{ N}$$

٣ - ٨ قوى الاحتكاك

لندرس الآن طبيعة قوة الاحتكاك التى تعوق الجسم عند انزلاقه على سطح ما . يمكنك أن تتعلم شيئا قليلا عن قوى الاحتكاك بأن تدفع كتابك عبر المنضدة كما هو مبين فى شكل ٣ - ١١ . لنفرض أنك تزيد قوتك الدافعة ببطء كما هو مبين فى شكل ٣ - ١١ ب . فى البداية لن يتحرك الجسم ، ولكن عندما تصل القوة الدافعة الى قيمة حرجة معينة سيبدأ الكتاب فى الحركة فجأة . نرى من ذلك أن هناك نهاية عظمى لقوة الاحتكاك التى تقاوم بداية الانزلاق ، وهى تساوى فى المقدار القوة الدافعة الحرجة التى تسبب انزلاق الجسم . وسنرمز لقوة الاحتكاك هذه والتى تقاوم بداية الانزلاق بالرمز f_s . (يرمز الدليل السفلى s الى كلمة استاتيكى «Static» أو كلمة ساكن «Stationary» لأن الجسم ساكن عند لحظة بداية الانزلاق) .

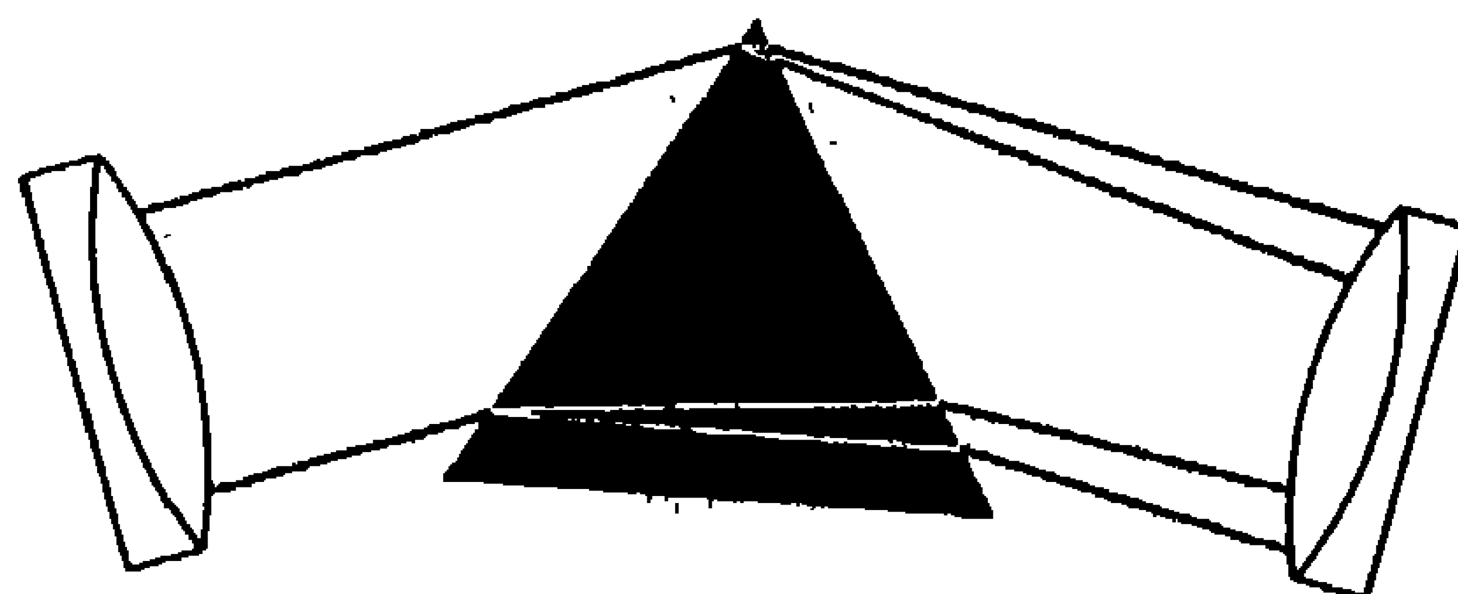
واذا بدأ الجسم فى الانزلاق فان قوة اصغر كثيرا من f_s ستكفى لاستمراره فى الحركة ، وهذا يوضح لنا أن قوة الاحتكاك التى تقاوم حركة جسم متحرك اقل من f_s ، وسنرمز لهذه القوة بالرمز f_k . (يرمز الدليل السفلى k الى كلمة حركى أو متحرك «Kinetic») يمكنك التحقق مما نقول بدفع كتاب على منضدة . جرب وسترى .

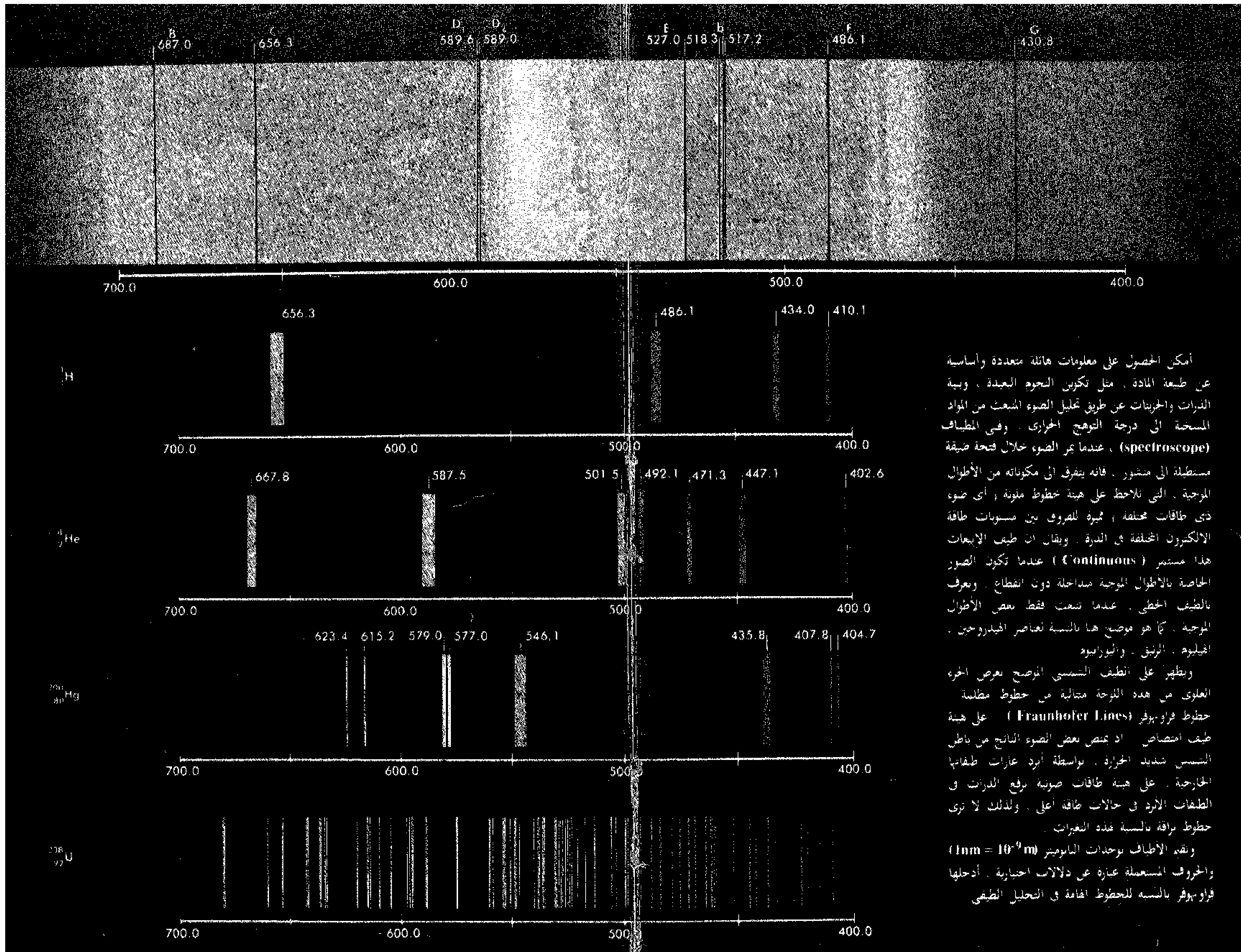
يمكن التعرف على الاسباب الرئيسية لهذا السلوك بالاستعانة بالشكل ٣ - ١٢ . وكما ترى فان السطحين المتلامسين ليسا أملسين . لذلك فان النقط الخشنة تتداخل فى بعضها وتسبب مقاومة السطحين للانزلاق . ومع ذلك فاذا بدأ الانزلاق فلن يتوفر الوقت الكافى للسطحين لكى يتلاحما تماما كل مع الآخر . كنتيجة لذلك فان القوة اللازمة لحفظ الجسم فى حالة الحركة اقل من القوة اللازمة لبدء حركته .



شكل (٣ - ١١)
تقل قوة الاحتكاك التى تعاكس حركة الكتاب فجأة عندما يبدأ الكتاب فى الانزلاق .

الأطياف الضوئية

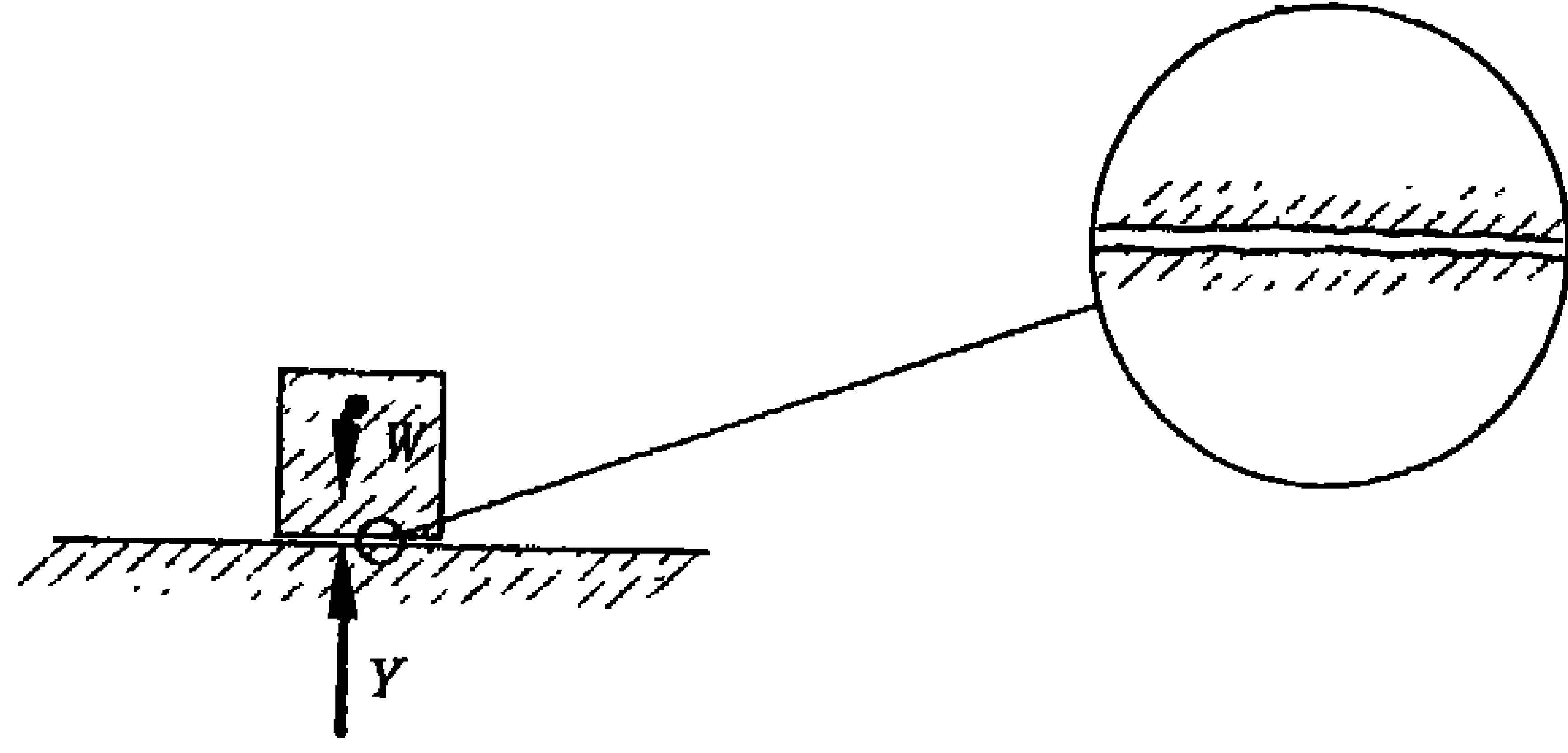




أمكن الحصول على معلومات هائلة متعددة وأساسية عن طبيعة المادة ، مثل تكوين النجوم البعيدة ، وبنية الذرات والجزيئات عن طريق تحليل الضوء المنبعث من المواد المسخنة الى درجة التوهج الحرارى . وفى المطياف (spectroscope) ، عندما يمر الضوء خلال فتحة ضيقة مستطيلة الى منشور ، فانه يتفرق الى مكوناته من الأطوال الموجية ، التى نلاحظ على هيئة خطوط ملونة ، أى ضوء ذى طاقات مختلفة ، مميزة للفروق بين مستويات طاقة الالكترون المختلفة فى الذرة . ويقال ان طيف الانبعاث هذا مستمر (Continuous) عندما تكون الصور الخاصة بالأطوال الموجية متداخلة دون انقطاع . ويعرف بالطيف الخطى ، عندما تنبعث فقط بعض الأطوال الموجية ، كما هو موضح هنا بالنسبة لعناصر الهيدروجين ، الهيليوم ، الزئبق ، واليورانيوم

ويظهر على الطيف الشمسى الموضح بعرض الجزء العلوى من هذه اللوحة متتالية من خطوط مظلمة خطوط فراونهوفر (Fraunhofer Lines) على هيئة طيف امتصاص اذ يمتص بعض الضوء الناتج من باطن الشمس شديد الحرارة ، بواسطة أبرد غازات طبقاتها الخارجية ، على هيئة طاقات ضوئية ترفع الذرات و الطبقات الأبرد فى حالات طاقة أعلى ، ولذلك لا ترى خطوط براقة بالنسبة لهذه التغيرات .

وتقاس الأطياف بوحدات النانوميتر ($1nm = 10^{-9} m$) والحروف المستعملة عبارة عن دلالات اختيارية ، أدخلها فراونهوفر بالنسبة للخطوط الهامة فى التحليل الطيفى



شكل (٣ – ١٢)
تظهر الخشونة المحسوسة للسطحين عند تكبيرهما تكبيرا كبيرا ، وهذا يصعب انزلاق احد السطحين على الآخر .

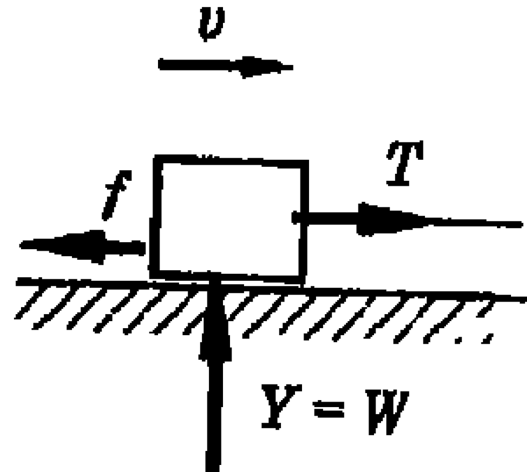
من المفيد فى كثير من الظروف أن تكون قادرا على ايجاد مقدار قوة الاحتكاك التى تقاوم الحركة . لهذا الغرض يعرف عادة معامل الاحتكاك μ (باليونانية ميو) التى تبين التجربة أنه يربط قوة الاحتكاك f **بالقوة العمودية** Y . والقوة العمودية هى ببساطة تلك القوة العمودية التى يدفع بها السطح الحامل الجسم المنزلق عليه . يمثل الشكل ٣ – ١٣ بعض المواقف النموذجية وقيم Y فى كل حالة ، وعليك دراسة كل منها والتأكد أن Y هى بالفعل كما هو مبين .

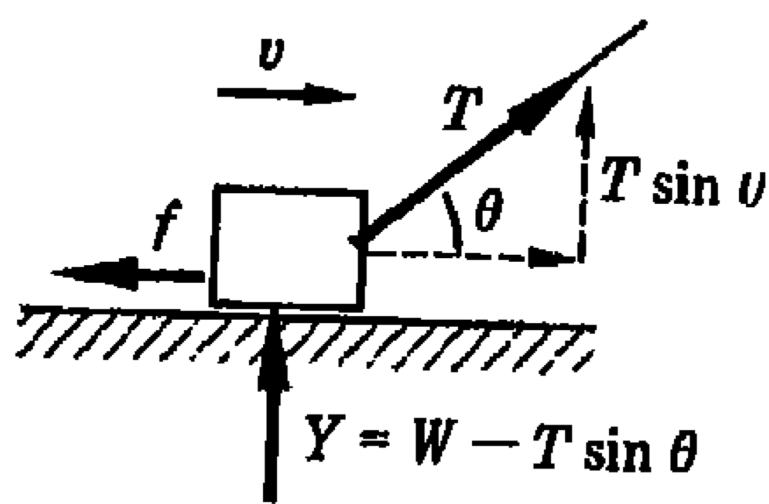
معامل الاحتكاك

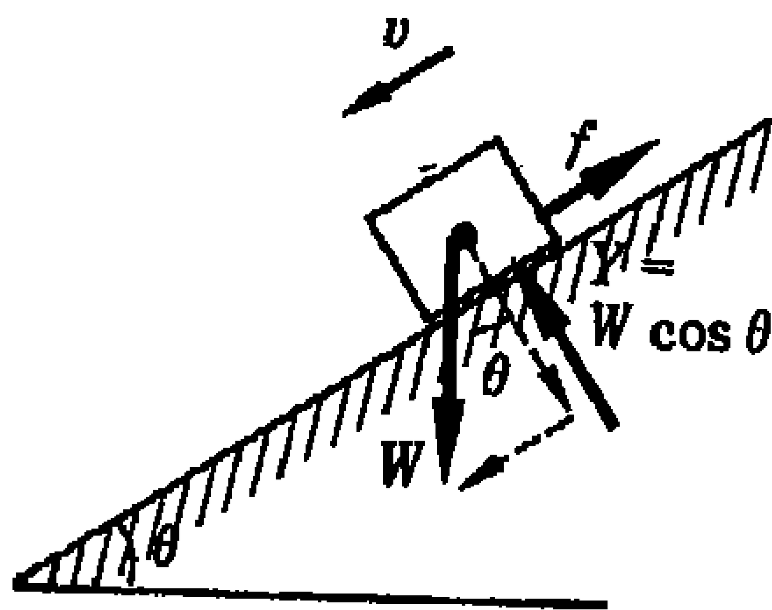
اذا قيست قوة الاحتكاك f التى تقاوم حركة جسم ينزلق على سطح ما يمكن ايجاد العلاقة التقريبية الآتية :

(٣ – ٣)

شكل (٣ – ١٣)
لاحظ أن القوةالعمودية Y لاتساوى بالضرورة وزن الجسم .







وتستخدم هذه العلاقة كتعريف **لمعامل الاحتكاك** μ . ويمكن صياغة هذه المعادلة بالكلمات كمايلى : تتناسب قوة الاحتكاك طرديا مع القوة العمودية . وقد وجد أن معامل الاحتكاك μ يختلف كثيرا من سطح الى آخر ، ويبين الجدول ٣ – ١ بعض القيم النموذجية لهذا المعامل .

يلاحظ أن قيم معامل الاحتكاك المدرجة فى الجدول ٣ – ١ تمثل معاملات الاحتكاك الحركية (أو الديناميكية) لأنها تنطبق فقط على الجسم الذى ينزلق بالفعل على السطح . من ناحية أخرى لاحظنا عند مناقشة الموقف الموضح فى شكل ٣ – ١١ أن قوة الاحتكاك قبل بداية الانزلاق مباشرة اكبر قليلا منها بعد بداية الانزلاق مباشرة ، لذلك فان معامل الاحتكاك فى هذه الحالة يسمى معامل الاحتكاك الاستاتيكى.وتعتمد جميع هذه المعاملات على الحالة الفعلية للسطح ، لذلك يجب استخدامها فقط كطريقة لتعيين القيمة التقريبية لقوة الاحتكاك .

جدول ٣ – ١

معاملات الاحتكاك الحركية*

μ	السطح ٢	السطح ١
~0.06	جليد	خشب
0.02-0.1	ثلج	نحاس اصفر
~0.07	معدن (مشحم)	معدن
0.25	خشب بلوط	خشب بلوط
0.5-0.9	خرسانة (مبللة)	مطاط
0.7-1.0	خرسانة (جافة)	مطاط

مثال توضيحي ٣ – ٧ . عند دراسة احدى الحوادث لاحظ ضابط الشرطة أن إحدى السيارات قد تركت آثار تزحلق على طريق مرصوف جاف ومستو وكان طول آثار التزحلق 7.0 m . احسب أقل حد لسرعة السيارة قبل بداية تزحلقها .

طريقة الحل . لنفرض أن السيارة قد تقاصرت بانتظام حتى السكون . لايجاد قيمة اكبر تقاصر ممكن للسيارة لنفرض (من جدول ٣ – ١) أن معامل الاحتكاك بين السيارة والطريق هو 0.90 .

واذا كانت كتلة السيارة m فان وزنها سيكون mg وعليه فان القوة العمودية Y لابد أن تتزن مع وزن السيارة ، وعليه فأن $Y = mg$ من هذا نجد أن :

$$f = \mu Y$$

وعليه فان قوة الاحتكاك التي تسبب وقوف السيارة هي :

$$f = 0.90\, mg$$

وهي القوة غير المتزنة المؤثرة على السيارة والتي تسبب تقاصرها . لايجاد التقاصر تطبق العلاقة $F = ma$ على السيارة مع العلم أن $F = \mu Y = f$

اذن فان العلاقة :

$$F = ma$$

ستصبح :

$$-0.9\, mg = ma$$

لاحظ أن كتلة السيارة تختزل من الطرفين لنحصل على $a = -0.90\, g$ ، حيث g تسارع الجاذبية .

يمكننا الآن حل مسألة الحركة المتعلقة بتزحلق السيارة . المعطيات (أو المعطيات الافتراضية) هي :

$$v_f = 0 \qquad s = 7.0\ \text{m} \qquad a = -0.90\, g = -8.8\ \text{m/s}^2$$

* تقرأ هذه العلامة ~ هكذا « تقريبا »

والمطلوب ايجاد السرعة الابتدائية v_0.لتحقيق ذلك نستخدم العلاقة $v_f^2 = v_0^2 + 2as$
اذن :

$$0 = v_0^2 - (17.6)(7.0)\ \mathrm{m^2/s^2}$$

ومنه نجد أن :

$$v_0 = 11.1\ \mathrm{m/s}$$

وبجميع الاحتمالات ، كانت السيارة تتحرك بسرعة ابتدائية اكبر من هذه السرعة . لماذا يمكننا أن نستنتج ذلك ؟

٣ - ٩ السرعة النهائية

افترضنا حتى الآن أن الاجسام التى تسقط سقوطا ذاتيا تتسارع بمعدل قدره $9.8\ \mathrm{m/s^2}$. ولكن ريشة أو قصاصة ورق صغيرة ساقطة لاتتسارع بالطبع بنفس هذا المعدل لأن من السهل أن نلاحظ أن كليهما تسقط بسرعة أقل من سقوط قطعة عملة معدنية أو حجر ، وقد وضحنا سابقا أن قوة الاحتكاك الناتجة من اندفاع الهواء على الجسم الساقط هى التى تسبب هذا التأثير . وبناء على ذلك يمكن أن يعامل الجسم كجسم يسقط سقوطا ذاتيا اذا كانت قوة الاحتكاك مهملة .

تصل الريشة الى السرعة النهائية بعد فترة قصيرة جدا من لحظة اسقاطها . وفى الحقيقة فان أى جسم يسمح له بالسقوط مسافة كبيرة فى الهواء سيصل الى سرعة ثابتة تسمى **السرعة النهائية** . وحيث أن الجسم لم يعد متسارعا (لان سرعته ثابته) لايمكن أن تؤثر على الجسم أى قوة غير متزنة ، أى أن شد الجاذبية الارضية للجسم لابد أن يكون قد اتزن مع قوة ما متجهة الى أعلى . هذه القوة هى ببساطة قوة احتكاك الهواء المندفع على الجسم الساقط .

وحيث أن الريشة خفيفة وممتدة فى الفراغ فان سرعة صغيرة وقوة احتكاك هوائى صغير يلزمان للاتزان مع جذب الجاذبية الأرضية . لهذا السبب يكون متوسط السرعة النهائية للريشة الى اسفل صغير جدا ، وقد يصل الى جزء من المتر فى الثانية فقط . وفى الحقيقة فان الريشة تصل الى هذه السرعة فى اقل من $1/10$ s من لحظة اسقاطها ، وبعد هذا الزمن يتوقف تسارع الريشة تماما .

وعموما تتصرف جميع الأجسام السابقة بنفس الطريقة . ولكن كلما كان الجسم اكثر تضاما واكبر كثافة كلما زادت السرعة النهائية . من الامثلة النموذجية للسرعة النهائية للاجسام الساقطة (القيم تقريبية جدا) مايلى : قطرة المطر 25 ft/s ، دقيقة الدخان 0.1 ft/s ، الانسان 250 ft/s . وبالطبع فان هذه القيم تعتمد على شكل واتجاه الجسم الساقط . يمثل الشكل ٣ - ١٤ مثالا مثيرا للسرعة النهائية .



شكل (٣ - ١٤)
مثال للسرعة النهائية .
(جريدة الديلي اكسبريس اللندنيـــة - استعـــراض تصويرى)

ملخص :

تساعدنا النتائج العملية على صياغة قوانين الطبيعة . تلخص هذه القوانين الطريقة التى يتصرف بها العالم من حولنا . لابد أن نكون مستعدين لتعديل القوانين كما هى مصاغة فى الوقت الحاضر اذا أثبتت تجارب المستقبل أن الصيغة ليست صحيحة تماما .

يتكون قانون نيوتن الأول للحركة من جزءين . يبين لنا الجزء الأول أن الجسم الساكن يستمر فى حالة السكون مالم تؤثر عليه قوة محصلة تختلف عن الصفر . ينص الجزء الثانى على أن السرعة الموجهة لجسم ما لاتتغير مالم تؤثر على الجسم قوة محصلة تختلف عن الصفر .

قانون نيوتن الثالث للحركة هو قانون الفعل ورد الفعل . ينص هذا القانون على أن أية قوة يؤثر بها الجسم A على الجسم B تكون مصحوبة بقوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه يؤثر بها الجسم B على A .

يلخص قانون نيوتن الثانى بالمعادلة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. ينطبق هذا القانون على جسم كتلته m وتؤثر عليه قوة قدرها $\mathbf{F}$،تسارع الجسم $\mathbf{a}$ فى نفس اتجاه $\mathbf{F}$.

تقيس كتلة الجسم m القصور الذاتى لهذا الجسم . اذا كانت m كبيرة فان القصور الذاتى للجسم يكون كبيرا : من الصعب تحريك هذا الجسم اذا كان ساكنا . من الصعب وقف الجسم أو حرفه عن اتجاهه اذا كان متحركاً . وحدات الكتلة هى الكيلوجرام (فى النظام SI) والجرام (فى النظام cgs) والسلج (فى النظام البريطانى) .

عند استخدام القانون $F = ma$ لابد أن تكون الوحدات من نفس النظام . الوحدات الواجب استخدامها فى النظام SI هى النيوتن والكيلوجرام والمتر فى الثانية المربعة . الوحدات المقابلة فى النظام cgs هى الداين والجرام والسنتيمتر فى الثانية المربعة . الوحدات المستخدمة فى النظام البريطانى هى الباوند والسلج والقدم فى الثانية المربعة . لايجب استخدام أى وحدات اخرى .

*(London Daily Express — Pictorial Parade).

اذا كان وزن الجسم الذى كتلته m هو W مقاسا فى مكان تسارع الجاذبية فيه هو g فأن $W = mg$ ، وهذا ببساطة هو القانون $\bar{F} = ma$ مكتوبا فى حالة تجربة السقوط الذاتى .

اذا كان الجسم منزلقا فانه يعانى قوة معوقة f تسمى قوة الاحتكاك . يدفع السطح الحامل الجسم المنزلق بقوة قدرها Y حيث Y متجهة فى الاتجاه العمودى على السطح . وجد اذن أن $f = \mu Y$ حيث μ يسمى معامل احتكاك السطحين المعنيين .

يتعرض الجسم الساقط فى الهواء أو أى غاز آخر أو مائع لقوة معوقة هى قوة الاحتكاك ، وحيث أن هذه القوة تزداد مع سرعة السقوط فانها ستصبح فى نهاية الامر مساوية لشد الجاذبية الأرضية . عندئذ ستختفى أية قوة غير متزنة مؤثرة على الجسم . لذلك فان الجسم سيسقط بسرعة ثابتة تسمى السرعة (أو معدل الحركة) النهائية .

الحد الادنى من الاهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب ان تكون قادرا على عمل الآتى :

١) صياغة قانون نيوتن الأول واعطاء بعض الامثلة لتوضيح كل جزء منه .

٢) صياغة قانون نيوتن الثالث . توضيح قوتى الفعل ورد الفعل فى أى موقف بسيط معروف .

٣) تسجيل قائمة لبعض الاجسام المعروفة بحيث تكتب بالترتيب من أقل الى اكبر قيمة للقصور الذاتى . اختيار تلك الكميات من القائمة التالية التى تسبب دائما عند تغيرها تغيرا كبيرا فى القصور الذاتى:
الحجم ، الشكل ، الوزن ، معدل الحركة ، السرعة ، الكتلة ، الحركة .

٤) صياغة قانون نيوتن الثانى بالكلمات وفى صورة معادلة رياضية . شرح معنى F فى هذا القانون بوضوح .

٥) تسجيل قائمة بالوحدات الاساسية للزمن والطول والكتلة فى كل من انظمتنا الثلاثة للوحدات . تسجيل قائمة بوحدات القوة المستخدمة فى كل من هذه الانظمة الثلاثة ايضا .

٦) كتابة المعادلة التى تربط الكتلة بالوزن . شرح العلاقة بين هذه المعادلة والقانون $F = ma$. توضيح كيفية تغير كل من W ، g ، m عندما يذهب شخص ما من الأرض الى القمر .

٧) حساب F أو m أو a لجسم بالاستعانة بالمعلومات الكافية من القائمة التالية : القوى المؤثرة على الجسم ، الوزن ، الكتلة ، معلومات كافية عن الحركة لحساب a .

٨) كتابة كمية باستخدام البادئة ، مثلا 1.2 ng على صورة الرقم 10 مرفوع الاس المناسب ، مثلا 1.2×10^{-9} g القدرة على اجراء العملية العكسية (انظر الملحق ٢ وكذلك هذا الفصل) .

٩) تعيين القوة العمودية المؤثرة على جسم منزلق باستخدام المعلومات الكافية. استخدم Y لتعيين f أو μ بمعلومية أى منهما .

١٠) حساب المسافة التى ينزلقها جسم معلوم الوزن عندما تكون السرعة الابتدائية والقوى المؤثرة عليه معلومة .

١١) تحليل المواقف التى تكون الاجسام فيها مرتبطة والمشابهة لتلك المواقف التى نوقشت فى المثالين التوضيحيين ٣ – ٤ و ٣ – ٥ .

١٢) شرح الشروط التى يمكن للجسم الساقط فى الهواء ان يصل فيها الى السرعة النهائية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب ان تكون قادرا على شرح كل من الآتى :

القانون الفيزيائى

القصور الذاتى

قوانين نيوتن الثلاثة للحركة

انظمة الوحدات SI و cgs والنظام البريطانى .

وحدات الكتلة (كيلوجرام ، جرام ، سلج)

وحدات القوة (نيوتن ، داين ، باوند)

القوة العمودية

معامل الاحتكاك μ .

اسئلة وتخمينات

١) صدمت سيارة سيارة اخرى ساكنة من الخلف . وكانت الاصابات التى تعرض لها كلا السائقين (بفرض حدوث الاصابات) ذات طبيعة مختلفة . اشرح مايحدث لكل سائق .

٢) ماذا يحدث لزنبرك مقعد سيارة تجلس عليه سيدة عندما تمر السيارة فوق نتوء كبير فى الطريق ؟ اشرح .

٣) عين بوضوح قوتى الفعل ورد الفعل فى المواقف التالية : (أ) يركل لاعب كرة القدم الكرة ، (ب) تحفظ الشمس الأرض فى مدارها ، (جـ) تصطدم قطرة المطر بالنافذة ، (د) تنطلق رصاصة من بندقية ، (هـ) يتسارع صاروخ الى أعلى ، (و) تخترق رصاصة جذع شجرة وتقف .

٤) هل يمكن لجسم أن يتسارع الى أسفل نحو الأرض بمعدل اكبر من g ؟

٥) يعتقد عموما أنه اذا سقط شخص سكران من النافذة فان اصابته تكون فى المتوسط أقل من اصابة شخص غير سكران . هل يمكنك أن تشرح لماذا قد يكون هذا الاعتقاد صحيحا ؟

٦) لماذا يكون اشد خطورة على الغطاس أن يسقط على الممشى الخرسانى المحيط بحمام السباحة عما لو سقط فى الماء ؟ اشرح .

٧) لنفرض أنك قد أسقط قالبا من ارتفاع قدره بضع بوصات على يدك وهى مفتوحة . لماذا تحس يدك بألم شديد اذا كانت منبسطة على المنضدة بالرغم من أنك تستطيع أن تلتقف الحجر بسهولة بدون الم فى ظروف أخرى ؟

٨) اذا كانت هناك مخلوقات حية تعيش على احد الاجرام البعيدة فى الكون ، هل يحتمل أن تستخدم هذه المخلوقات نفس وحدات الزمن والطول والوزن والكتلة التى نستخدمها نحن ؟ أى هذه الوحدات يحتمل أن تكون اكثر سهولة فى فهمها واستنساخها بالنسبة لهم ؟

٩) اذا سقطت كرة بنج بونج على المنضدة فانها ترتد مرة ثانية الى الهواء . ما الذى ركلها الى أعلى ؟

١٠) يحس بعض الناس باحساس داخلى غريب (وعادة مايكون احساسا مزعجا فى فم المعدة) عندما يتواجدون داخل مصعد متحرك . اشرح سبب هذه الظاهرة .

١١) رجل يقف فى مصعد ماسكا غليونه فى يده . وعندما انقطع حبل المصعد دهش هذا الرجل دهشة شديدة لدرجة أنه اسقط غليونه . ماذا يحدث للغليون ؟ ولاتهمل تأثيرات الاحتكاك على اجهزة المصعد) .

١٢) قدر اقل مسافة يمكن أن تتسارع السيارة فيها من السكون الى سرعة قدرها 10 m/s اذا كان موتورها قويا للغاية . (ق)

١٣) من أين تأتى القوة التى تسبب تسارع لاعب القفز العالى الى أعلى عندما يترك هذا اللاعب الأرض ؟ قدر القوة التى يجب أن تؤثر على اللاعب لكى يقفز اللاعب إلى ارتفاع 2 m . (ق)

١٤) سقطت زهرية ورد وزنها 2 lb من النافذة وكانت سرعتها قبل أن ترتطم برأس رجل مباشرة تساوى 30 ft/s قدر القوة التى تؤثر بها الزهرية على رأس الرجل . هل يتغير الأمر اذا انكسرت الزهرية ؟ ماذا يحدث اذا استبدلت الزهرية بكيس من البلاستك مملوًا بالقمامة ؟ (ق)

١٥) قدر السرعة النهائية لقطرة صغيرة من الزئبق . اكثف من الماء 13.6 مرة . (ق) .

١٦) قدر القوة التى يؤثر بها كاحليك على الأرضية عندما تقفز من قمة سلم ارتفاعه 2.0 m . لماذا يجب أن تسمح بانثناء ساقيك فى مثل هذا الموقف . (ق)

مسائل :

حول جميع المسائل المعطاه فى النظام cgs الى SI قبل حلها .

١) يجذب زورق بخارى سريع لاعب تزحلق على الماء بسرعة ثابتة مقدارها 12 m/s وكان الشد فى الحبل الذى يجذب اللاعب 140 N . ماهى قوة الاحتكاك التى تعاكس حركة اللاعب ؟

٢) يهبط مظلى وزنه 150 lb بالمظلة (باراشوت) الى الأرض بسرعة قدرها 25 ft/s ، وكان وزن المظلة نفسها 20 lb . ماهى القوة التى يدفع بها الهواء المظلى والمظلة إلى أعلى ؟

٣) اعطيت سيارة وزنها 3200 lb تسارعا قدره $0.50\ ft/s^2$ فى طريق مستو . احسب القوة غير المتزنة التى تعطى السيارة هذا التسارع اذا كان الاحتكاك مهملا .

٤) يلزم وقف سيارة وزنها 1300 Kg متحركة بمعدل 20 m/s فى مسافة قدرها 80 m . ماهو تقاصر السيارة بفرض أنه منتظم ؟ وماقيمة القوة غير المتزنة الضرورية لذلك ؟

٥) يراد قطر سيارة كتلتها 1500 Kg بالاستعانة بسيارة اخرى فاذا كانت السيارة المقطورة تحتاج الى مسافة قدرها 3.0 m لكى تتسارع بانتظام من السكون الى سرعة قدرها 2.0 m/s ، فماهى القوة التى يجب أن يتحملها حبل القطر ؟ اكتب اجابتك بالنيوتن والباوند .

٦) قوة الاحتكاك التى تعوق حركة صندوق معين كتله 400 lb فوق ارض مستوية هى 100 lb . ماهو التسارع اللازم اعطاءه لهذا الصندوق اذا سحب بقوة قدرها 200 lb باستخدام حبل مائل بزاوية قدرها 53° على الافقى ؟

٧) كانت سيارة وزنها 3200 lb تتحرك بمعدل 60 ft/s عندما اصطدمت بشجرة فتوقفت بعد مسافة قدرها 5 ft . ماقيمة متوسط القوة المعيقة التى أثرت بها الشجرة على السيارة ؟

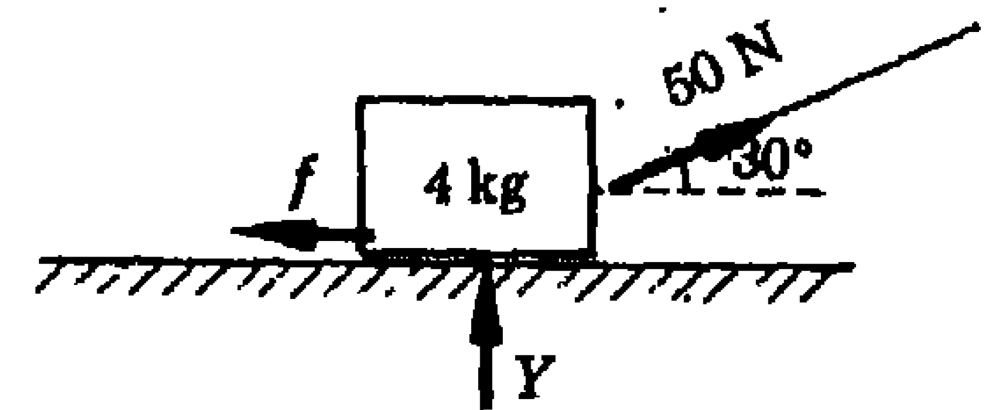
٨) يجذب شخص كتلة قدرها 5 kg رأسيا الى أعلى مستخدما حبلا يستطيع بالكاد حمل كتافة قدرها 20 kg فى حالة السكون . ماهو أقصى تسارع يمكن لهذا الشخص اعطاؤه للكتلة 5 Kg ؟

٩) يقف شخص وزنه 160 lb على ميزان زنبركى دقيق فى داخل مصعد . ماهى قراءة الميزان عندما يتحرك المصعد (أ) الى أعلى بتسارع قدره $10\ ft/s^2$ ، (ب) الى اسفل بتسارع قدره $10\ ft/s^2$ ؟

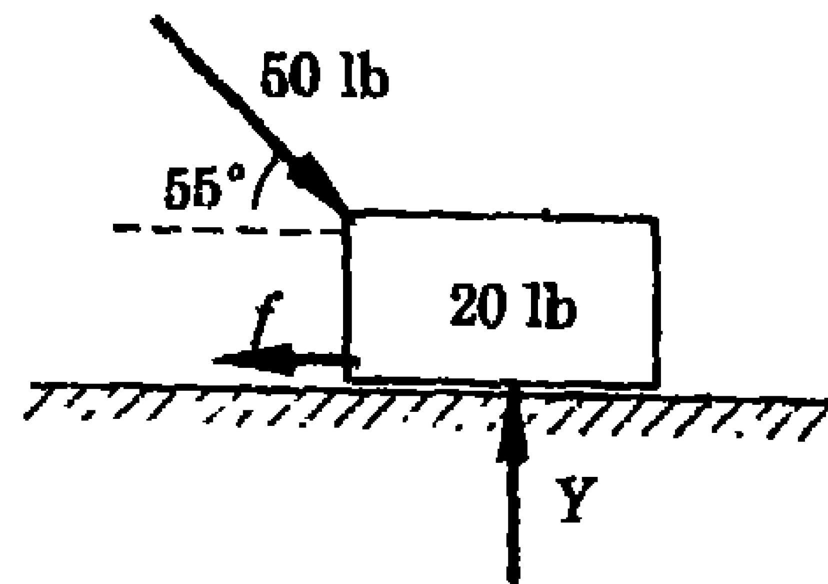
١٠) علقت كتلة قدرها 100 g فى خيط ثم علقت كتلة أخرى قدرها 200 g فى قاع الكتلة 100 g باستخدام خيط آخر . اوجد الشد فى الخيطين اذا كانت الكتلتان (أ) ساكنتان ، (ب)متسارعتان إلى اعلى بمعدل $20\ cm/s^2$ ، (جـ) ساقطتان ذاتيا تحت تأثير الجاذبية الأرضية . الأرضية .

١١) معامل الاحتكاك بين صندوق وأرضية الحجرة هو 0.40 . فاذا دفع الصندوق دفعة شديدة بحيث انزلق بسرعة قدرها 5 ft/s ، فما هى المسافة التى يتحركها قبل أن يقف ؟

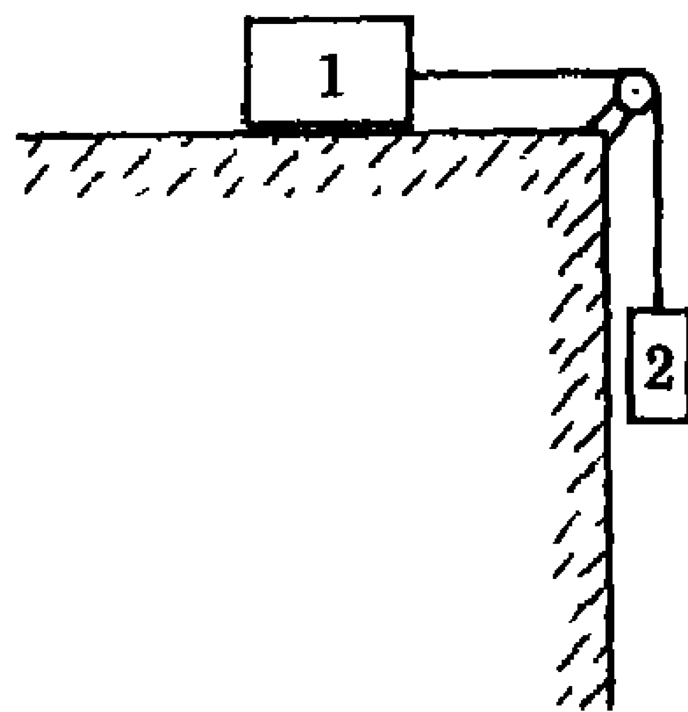
١٢) اوجد تسارع القالب الذى كتلته 4 Kg والمبين فى شكل م ٣ – ١ اذا كان معامل الاحتكاك بين القالب والسطح 0.60 .



شكل (م ٣ – ١)



شكل (م ٣ – ٢)



شكل (م ٣ – ٣)

١٣) اوجد تسارع القالب الموضح فى شكل م ٣ – ٢ اذا كان معامل الاحتكاك بين القالب والسطح هو 0.40 .

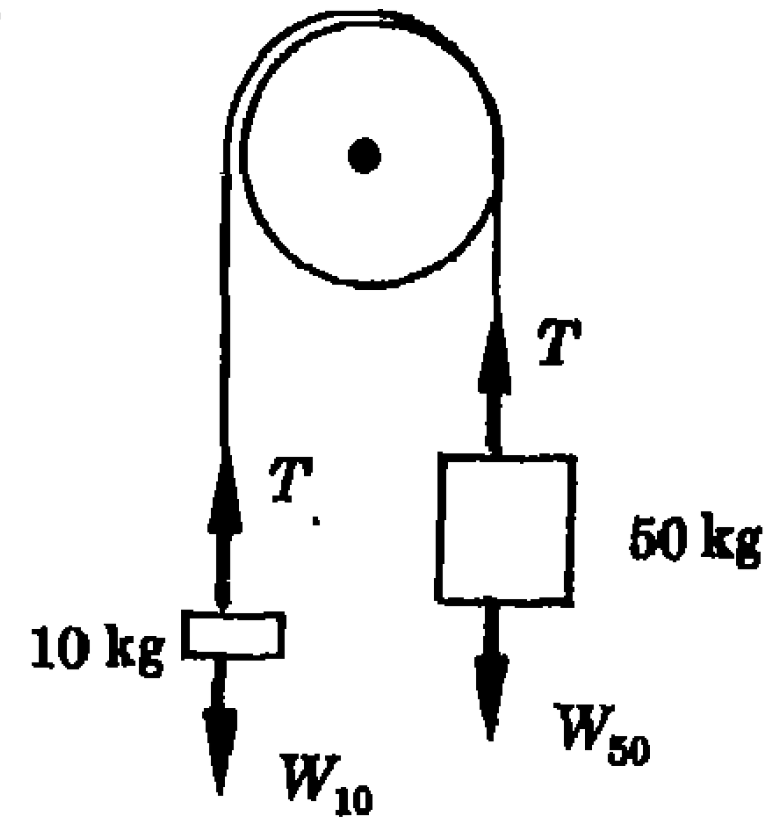
١٤) تقاصرت شاحنة تتحرك فى طريق مستو استعدادا للوقوف وكانت هذه الشاحنة تحمل صندوقا كبيرا فى مؤخرتها، فاذا كان معامل الاحتكاك بين الصندوق وقاع الشاحنة يساوى 0.55 قبل بدء انزلاق الصندوق مباشرة ، فما هو أقصى تسارع يمكن ان تكتسبه الشاحنة بحيث لاينزلق الصندوق ؟

١٥) فى الشكل م ٣ – ٣ كتلة القالب 1 هى 2.50 kg وكتلة القالب 2 هى 1.60 kg . اوجد تسارع القالبين وكذلك الشد فى الخيط الذى يوصلهما اذا كان الاحتكاك مهملا . كرر الحل بفرض ان هناك قوة احتكاك مقدارها 12.0 N تعوق حركة القالب 1 .

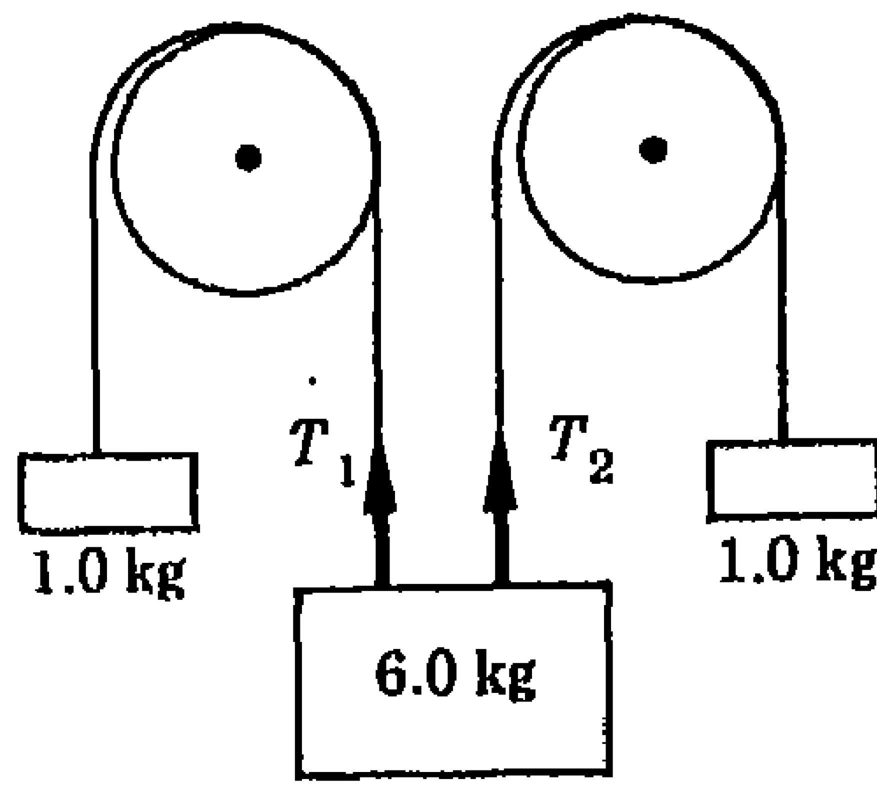
١٦) فى الشكل م ٣ – ٣ كتلة الجسم 1 هى 3000 g وكتلة الجسم 2 هى 2000 g . وعند تحرير المجموعة وجد أن الجسم 2 يسقط مسافة قدرها 50 cm فى زمن قدره 1.50 s . ماقيمة قوة الاحتكاك المعاكسة لحركة الجسم 1 ؟ افترض عدم وجود قوى احتكاك عندما تكون المجموعة فى حالة السكون .

١٧) ربطت كتلتان قيمة كل منهما 4 Kg فى طرفى حبل ثم علق الحبل على بكرة لا احتكاكية لتكون آلة أتوود . فاذا اضيفت الآن 2000 g الى احدى الكتلتين ، (أ) فما هو الشد فى الحبل ، (ب) وماهو الزمن اللازم لسقوط الكتلة الأكبر مسافة 2 m ؟

١٨) اوجد الشد فى الحبل والزمن اللازم لكى تتحرك الكتلتان الموضحتان فى شكل م ٣ – ٤ مسافة 50 cm من السكون . افترض ان البكرة لااحتكاكية وعديمة الكتلة



شكل (م ٣ – ٤)



شكل (م ٣ – ٥)

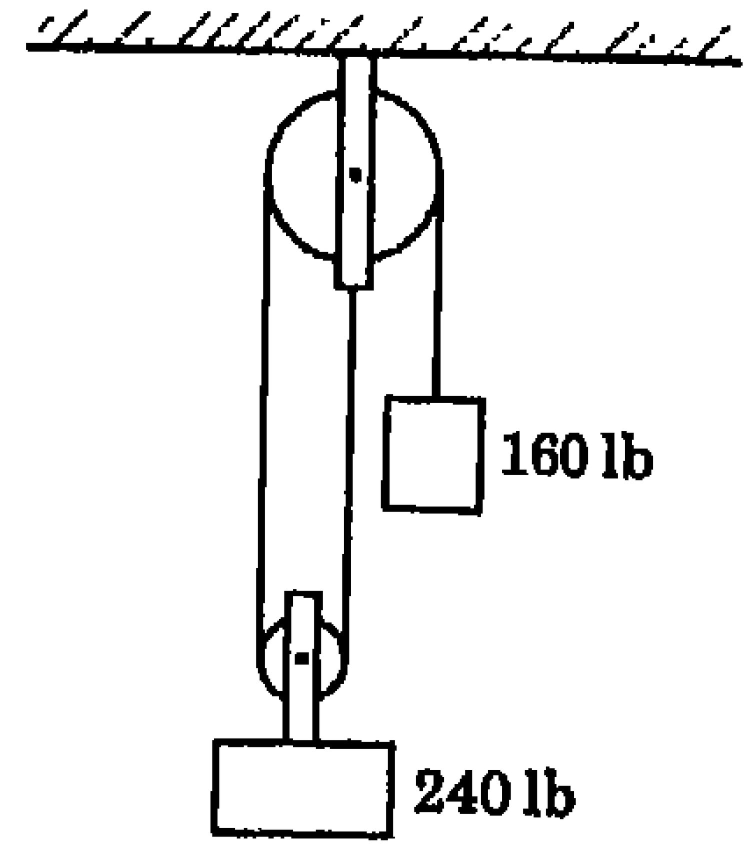
١٩) اوجد T_1 وكذلك تسارع القالب الذى كتلته 6 kg فى الموقف الموضح فى شكل م ٣ – ٥ .

٢٠)* علقت كتلة قدرها 500 g فى نهاية سلك زنبركى خفيف ، وعند اضافة 200 g الى الكتلة 500 g استطال السلك الزنبركى بمقدار 10 cm . ثم رفعت الكتلة 200 g فجأة . ماهو تسارع الكتلة 500 g فى اللحظة التالية للرفع مباشرة ؟

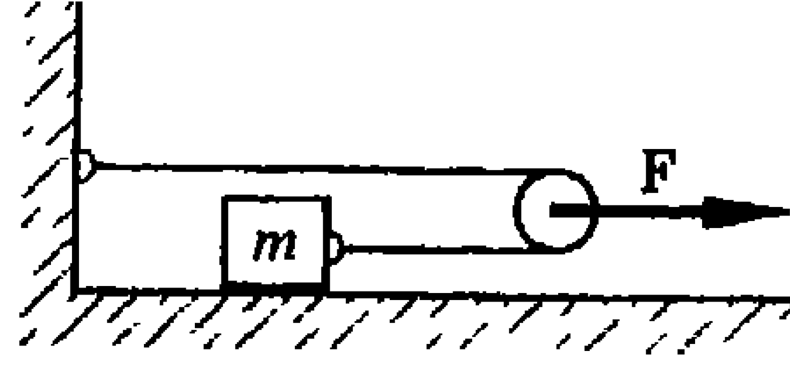
٢١) اودعت عالمة فيزياء فى شاحنة صندوقية مغلقة لاحد القطارات ، فعلقت جسما وزنه 8 lb كبندول بسيط فى السقف . وعندما بدأ القطار فى التسارع لاحظت هذه العالمة أن البندول يتعلق مستقرا فى وضع يميل بزاوية قدرها 10° على الرأسى . ماقيمة تسارع القطار ؟ هل تحتاج هذه العالمة حقيقة لأن تعلم وزن الجسم لكى تحل هذه المسألة ؟

٢٢)** فى الشكل م ٣ – ٦ وزن الجسم الكبير هو 240 lb ووزن الجسم الصغير هو 160 lb . اوجد الشد فى السلك وكذلك تسارع كل من الثقلين . تلميح : لاحظ ان الثقل الكبير يتحرك نصف المسافة التى يتحركها الثقل الصغير فقط . وحيث ان البكرتين لا احتكاكيتين وعديمتى الكتلة فان الشد فى السلك متساو فى كل اجزائه .

٢٣)** فى الشكل م ٣ – ٧ يفترض ان البكرة عديمة الكتلة ولا احتكاكية . اوجد تسارع الكتلة m بدلالة F اذا لم يكن هناك احتكاك بين السطح والكتلة m . كرر العمل بفرض وجود قوة احتكاك مؤثرة على m قيمتها f .



شكل (م ٣ – ٦)

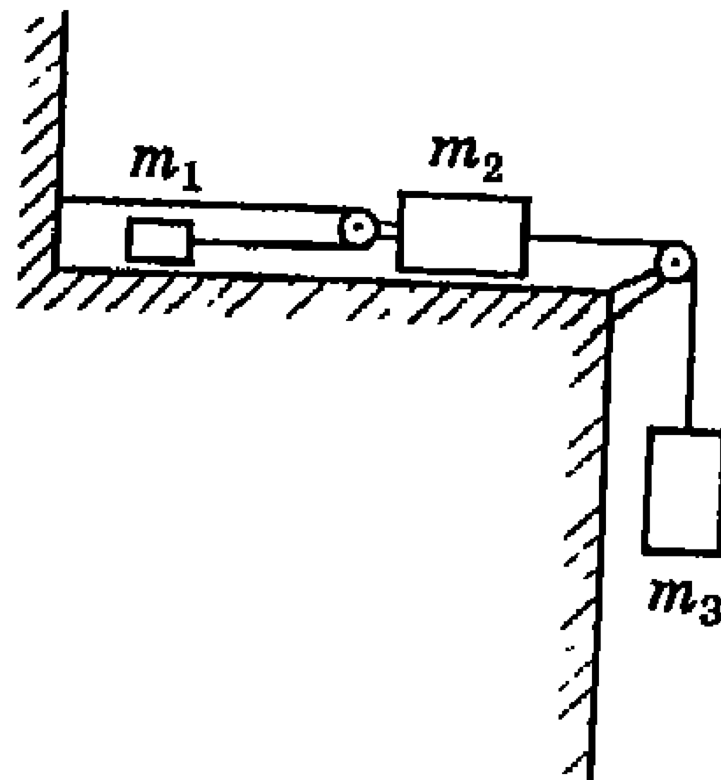


شكل (م ٣ – ٧)

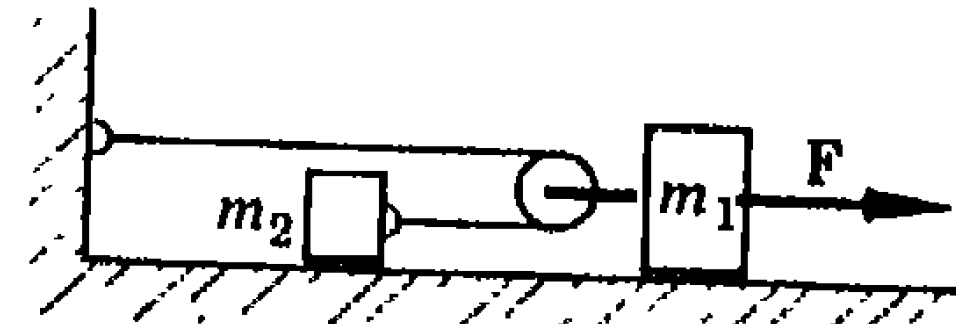
٢٤)** فى الشكل م ٣ – ٨ يفترض ان الاحتكاك بين القالبين والمنضدة مهملا . احسب الشد فى الخيط وتسارع الكتلة m_2 اذا كانت $m_1 = 300$ g، $m_2 = 200$ g ، $F = 0.40$ N تلميح : لاحظ أن $a_2 = 2a_1$.

٢٥)** اوجد الشد فى الحبلين وتسارع كل من القالبين الموضحين فى شكل م ٣ – ٩ اذا كان الاحتكاك مهملا . افترض ان البكرتين عديمتى الكتلة ولا احتكاكيتين . ($m_1 = 200$ g; $m_2 = 500$ g; $m_3 = 300$ g.)

٢٦)** اذا كانت قوة الاحتكاك المؤثرة على كل من القالبين المنزلقين على المنضدة الموضحة فى شكل م ٣ – ٩ هى 2 lb، اوجد تسارع كل من القالبين والشد فى الخيوط . (وزن الكتل 1 ، 2 ، 3 هى 8 lb ، 32 lb ، 16 lb على الترتيب) .



شكل (م ٣ – ٩)



شكل (م ٣ – ٨)

الفصل الرابع

الحركة تحت تأثير الجاذبية الأرضية

فى الفصل السابق استخدمنا حقيقة أن الأرض تؤثر بقوة جاذبة تثاقلية على الاجسام القريبة منها . وفى هذا الفصل سنجد أن التجاذب التثاقلى يحدث بين أى قطعتين من المادة . كذلك فاننا سوف نذكر ونناقش الصورة الرياضية لهذه القوة . وبالاستعانة بهذه المعلومات سنكون قادرين على فهم حركة الأجسام التى تتحرك فى اتجاه يميل بزاوية ما على سطح الأرض .سندرس أيضا هذا النوع من الحركة آخذين حركة المقذوفات كمثال لها .

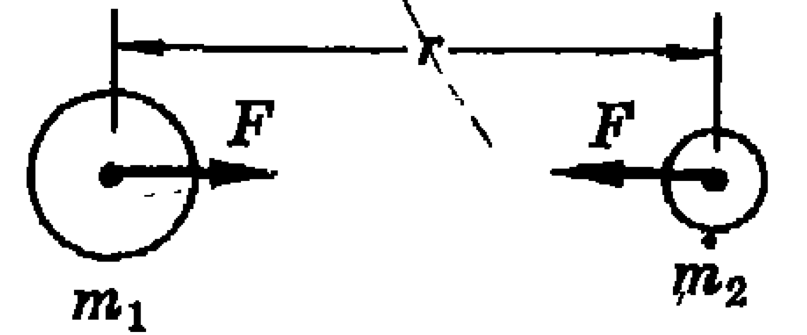
٤ – ١ قانون نيوتن للجاذبية

اكتشف علماء الفلك قبل نيوتن بفترة كبيرة أن كواكب نظامنا الشمسى تدور حول الشمس . وقد عرفت حركات هذه الكواكب بدقة كبيرة كما أمكن التنبؤ بحركاتها فى المستقبل بمنتهى الدقة . ولكن هذا قد تحقق فى الواقع بدون فهم حقيقى لاسباب هذه الحركات .

كان نيوتن أول من وضح طبيعة القوى المسئولة عن الحركة الكوكبية . وحيث أنه كان يعلم أن « الجسم المتحرك سيستمر فى الحركة فى خط مستقيم الى الأبد مالم تؤثر عليه قوة خارجة » فقد كان من الواضح له أن هناك قوة خارجية تؤثر على كل كوكب . ونظرا لأن الكواكب تتحرك فى مدارات دائرية تقريبا فلابد من وجود قوة خارجية لكى تسبب انحرافها عن المسار المستقيم . وتبين التجربة أن الكرة المربوطة فى نهاية خيط والتى تتحرك فى دائرة تحتفظ بهذا المسار الدائرى بفضل جذب الخيط لها ، ويتجه جذب الخيط للكرة نحو مركز الدائرة دائما . يسمى هذا الجذب للجسم نحو مركز الدائرة باسم **القوة الجاذبة المركزية** ، وسنناقشه بتفصيل أكثر فى الفصل الثامن .

استنتج نيوتن أن الكواكب تقع تحت تأثير قوة جاذبة متجهة من الكوكب نحو الشمس وأن هذه القوة تحفظ الكوكب فى مساره الدائرى أو مداره حول الشمس . وقد تصور أن الشمس تؤثر على الكواكب بقوة جاذبة من نوع ما . علاوة على ذلك ، حيث أن القمر يدور حول الأرض ، فلابد من وجود تجاذب بين القمر والأرض ، وهذه القوة الجاذبة المؤثرة على القمر هى التى تحفظه فى مداره حول الأرض . وهناك أيضا أقمار تدور حول الكواكب الأخرى ، وعليه فان هذا التجاذب بين جسم وآخر هو ظاهرة عامة .

شكل (٤ – ١).
يخبرنا قانون الفعل ورد الفعل أن قوة التجاذب التثاقلى المؤثرة على احدى الكرتين متساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه للقوة المؤثرة على الكرة الأخرى .



كان نيوتن أول من عبر عن القوة الجاذبة بين جسمين فى صورة رياضية.فقد قارن نيوتن الطريقة التى يجب أن تتحرك بها الكواكب تحت تأثير قوى جاذبة افتراضية مختلفة بحركتها المعروفة.فوجد أن نوعا واحدا من القوى هو الذى يؤدى الى حركة مطابقة تماما للحركة المعروفة وهذه القوة تتناسب طرديا مع حاصل ضرب كتلتى الجسمين وتتناسب عكسيا مع مربع المسافة بينهما . فاذا كانت المسافة بين مركزى الجسمين الكرويين الموضحين فى شكل ٤ – ١ هى r وكانت كتلتا الجسمين هما m_1 و m_2 فان القوة الجاذبة التى تؤثر بها احدى الكرتين على الأخرى ستعطى بالمعادلة* :

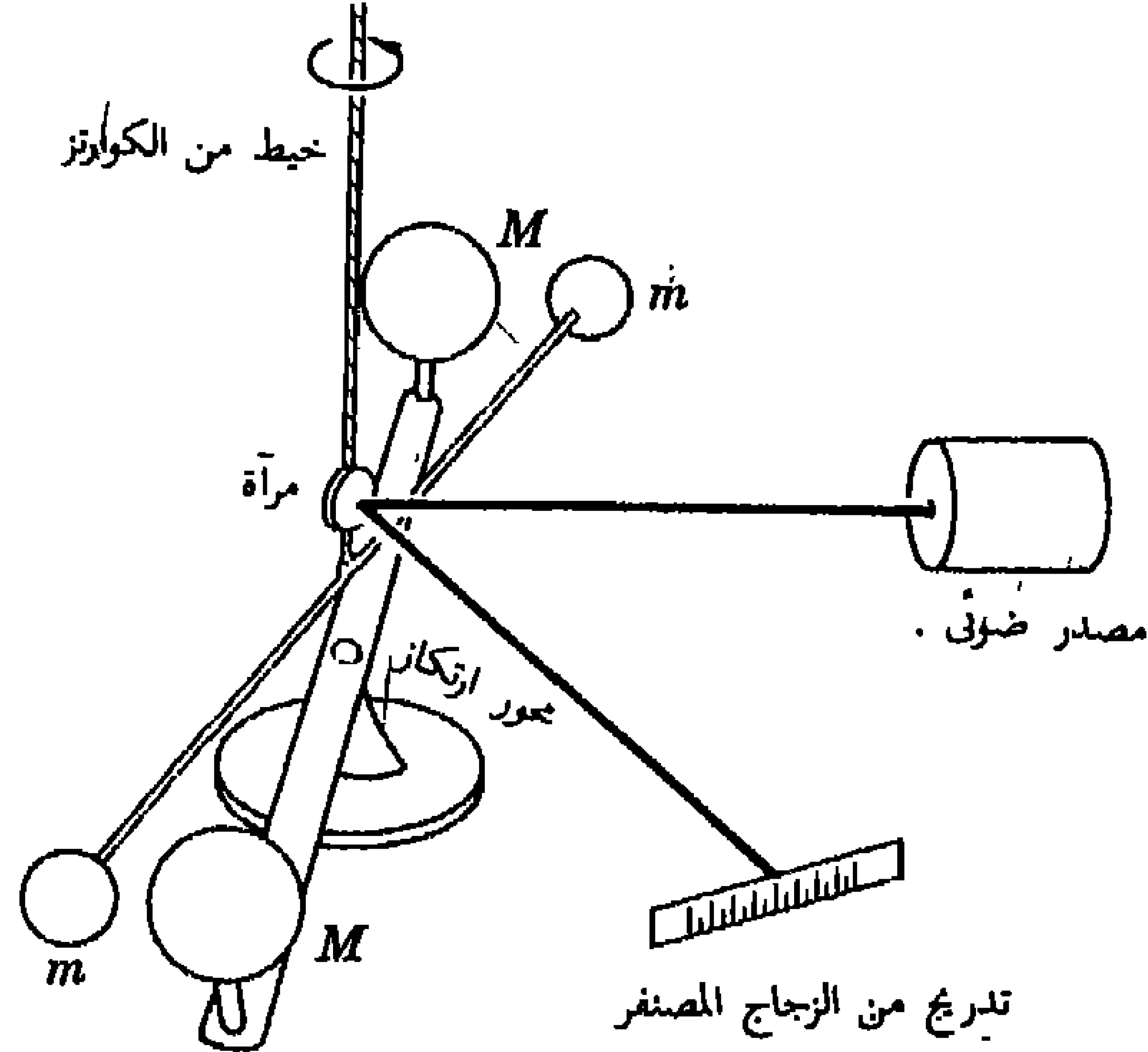
$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (٤ - ١)$$

* اذا لم يكن الجسمان كرويان فان قيمة r الواجب استخدامها ستكون أكثر تعقيدا . فضلا عن ذلك . اذا كان الجسمان صغيرين بالمقارنة بمسافة الانفصال ، فان r يمكن اعتبارها بتقريب كبير مسافة انفصال أى نقطتين على الجسمين .

قانون الجاذبية العام لنيوتن

حيث G ثابت تناسب قيمته مذكورة فيما بعد . وهذا هو **قانون الجاذبية العام لنيوتن** .

من الضرورى هنا أن نلاحظ أن الجسم m_1 يجذب الجسم الآخر m_2 بقوة قدرها F ، ولكن قانون الفعل ورد الفعل لنيوتن يبين لنا أن الجسم m_1 نفسه سيحس بقوة رد فعل مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه . وهذا يوضح السبب فى أننا قد بينا القوتين المتساويتين مقدارا والمتضادتين اتجاها المؤثرتين على الكرتين فى شكل ٤ — ١ .



شكل (٤ — ٢)
رسم تخطيطى لميزان كافنديش . لاحظ كيف يستخدم الشعاع الضوئى لكشف التواء الخيط .

لتطبيق قانون الجاذبية العام لنيوتن يجب معرفة ثابت الجاذبية G فى المعادلة (٤ — ١) ولسوء الحظ لايمكن حساب قيمة هذا الثابت نظريا ، ولكن يمكن تعيينها بالتجربة فقط . وقد كان هنرى كافنديش أول من عين قيمة ثابت الجاذبية فى عام ١٧٩٨ مستخدما جهازا يسمى **ميزان كافنديش** ، ويمثل شكل ٤ — ٢ أحد أشكال هذا الجهاز . الكتلتان الصغيرتان m معلقتان فى خيط رفيع دقيق جدا مصنوع من الكوارتز . عند تحريك الكتلتين الكبيرتين M بحيث تقتربان من الكتلتين الصغيرتين m يسبب التجاذب بين M و m التواء الخيط . وبعد معايرة الجهاز بحيث تعرف القوة اللازمة لحدوث التواء معين يمكن حساب قوة التجاذب بين m و M مباشرة من قيمة التواء الخيط المقاسة . وحيث أن m و M و r و F معلومة جميعها ، يمكننا اذن التعويض فى المعادلة (٤ — ١) لنحصل على :

$$F = G\frac{mM}{r^2}$$

ثم تحل المعادلة لايجاد المجهول الوحيد G .

وعمليا هذه التجربة دقيقة للغاية لأن قوة التجاذب صغيرة جدا . ولقياس الالتواء الصغير جدا للخيط يسمح لشعاع ضوئى بالانعكاس على مرآة مثبتة فى مجموعة

الخيط . وبهذه الطريقة فان أى التواء ضئيل فى الخيط يسبب انحرافا محسوسا للشعاع يمكن قياسه بسهولة أكثر . (يعرف استخدام الشعاع الضوئى بهذه الطريقة باسم **الذراع البصرية**) . ونظرا لرقة الخيط فان أقل حركة للهواء بالقرب منه ستعطل القياسات . لذلك فمن الضرورى اتخاذ التدابير اللازمة للتخلص من حركة واهتزاز الهواء اذا أريد الحصول على نتائج موثوق بها . وطبقا لأدق القياسات المتاحة فى الوقت الحاضر لثابت الجاذبية فان قيمة G هى كالتالى :

$$G = 6.672 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$$

مثال توضيحى ٤ -١ : بمجرد معرفة قيمة G يصبح من الممكن تعيين كتلة الأرض . لنفعل ذلك الآن .

طريقة الحل : لتحقيق ذلك يلزمنا ببساطة معرفة القوة التى تجذب بها الأرض جسما موجودا على سطحها . فمثلا ، وزن الجسم الذى كتلته m يساوى $W = mg$. ولكن هذه هى القوة التى تجذب بها الأرض وكتلتها M_{earth} هذا الجسم . وحيث أن المسافة بين مركزى الكتلتين M_{earth} و m ، هو ببساطة نصف قطر الأرض R_{earth} ، فان قانون الجاذبية يمكن كتابته على الصورة :

$$W = G\frac{M_{earth}m}{R^2_{earth}} \qquad (٤ - ٢)$$

وحيث أن $W = mg$ ، فان المعادلة السابقة تصبح :

$$mg = G\frac{M_{earth}m}{R^2_{earth}}$$

وباختزال m من الطرفين نجد أن :

$$g = G\frac{M_{earth}}{R^2_{earth}} \qquad (٤ - ٣)$$

وبالتعويض عن تسارع الجاذبية $g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$ ونصف قطر الأرض $R_{earth} = 6.4 \times 10^6\ \mathrm{m}$ فى المعادلة السابقة واستخدام قيمة G سنجد أن $M_{earth} = 6 \times 10^{24}\ \mathrm{kg}$. هل يمكنك استنباط طريقة يمكن استخدامها لتعيين كتلة القمر والشمس والكواكب ؟

من المهم أن نلاحظ أن المعادلة (٤ - ٣) تبين لنا كيف يعتمد تسارع الجاذبية على المسافة R مقاسة من مركز الأرض بشرط أن يستبدل نصف قطر الأرض R_{earth} بالمسافة R . ومن الواضح أنه كلما زادت R كلما قل g . ويمكن التأكد من هذه الحقيقة (حقيقة أن g يعتمد على المسافة من مركز الأرض) ، وقد تم ذلك بالفعل ، بقياس الفرق بين g عند مستوى سطح البحر وفوق قمم الجبال . وحيث أن السفر فى االفضاء قد أصبح الآن حقيقة واقعة ، أمكن اثبات أن g تتناسب عكسيا مع

مربع المسافة من مركز الأرض بدقة كبيرة . لاحظ مع ذلك أن هذه صحيح خارج سطح الأرض فقط . أما تحت سطح الأرض فان المعادلة (٤ — ٣) غير صحيحة ولايمكن تطبيقها .

تعريف

مجال الجاذبية

يستعمل مصطلح **مجال الجاذبية** كثيرا ، وهو يعنى فى الحياة اليومية تلك المنطقة التى تظهر فيها آثار قوة الجذب . ولكنه يعنى شيئا أكثر تحديدا بالنسبة للعالم . تعرف **شدة مجال الجاذبية فى نقطة ما بأنها قوة الجذب المؤثرة على وحدة الكتلة** الموجودة فى هذه النقطة . وقد تختلف شدة مجال الجاذبية من نقطة الى اخرى فى منطقة معينة ، ولكن لها قيمة محددة فى كل نقطة فى هذه المنطقة ، وهذه القيم لشدة مجال الجاذبية هى التى تكون مجال الجاذبية للمنطقة المعنية .

وقبل أن نترك هذا الجزء يجب أن نوضح أن قانون نيوتن للجاذبية يتضمن قانون جاليليو للاجسام الساقطة سقوطا ذاتيا . وكما ترى من المعادلة (٤ — ٣) ، تشطب كتلة الجسم الساقط من الطرفين ، وعليه فان تسارع الجاذبية واحد لجميع الاجسام أثناء السقوط الطليق وبالطبع فان قانون نيوتن اساسى أكثر من قانون جاليليو لأنه لايتضمن نتائج جاليليو فقط ، ولكن أيضا كثيرا من النتائج الأخرى .

مثال توضيحى ٤ — ٢ : أوجد النسبة بين وزن جسم ما على القمر ووزنه على الأرض . أوجد ايضا قيمة التسارع أثناء السقوط الذاتى على القمر .

طريقة الحل : عندما نتحدث عن وزن الجسم على الكوكب أو القمر فاننا نعنى قوة جذب الكوكب أو القمر لهذا الجسم . فى هذه الحالات تكون الأرض بعيدة بعدا كافيا لأن يجعل قوة جذبها للجسم صغيرة جدا ، فمثلا ، يبعد الجسم الموجود على سطح القمر عن الأرض حوالى 60 ضعفا قدر نصف قطر الأرض . وحيث أن التجاذب التثاقلى يقل مع $1/R^2$ فان جذب الأرض للجسم سيمثل فقط حوالى $1/3600$ قدر وزنه على سطح الأرض . من هذا نرى أن قوة جذب الأرض لجسم موجود على القمر صغيرة جدا ويمكن عادة اهمالها .

نعلم أن جذب القمر لجسم على سطحه هو :

$$F = G\frac{mM}{R^2} = W_{\text{moon}}$$

حيث m كتلة الجسم ، M كتلة القمر ($M \approx 0.0123 M_{\text{earth}}$ ، M_{earth} هى كتلة الأرض) ، R نصف قطر القمر ($R \approx 0.27 R_{\text{earth}}$ حيث R_{earth} هو نصف قطر الأرض) . وعليه فان وزن الجسم على القمر هو :

$$W_{\text{moon}} = 0.168 G \frac{mM_{\text{earth}}}{R^2_{\text{earth}}}$$

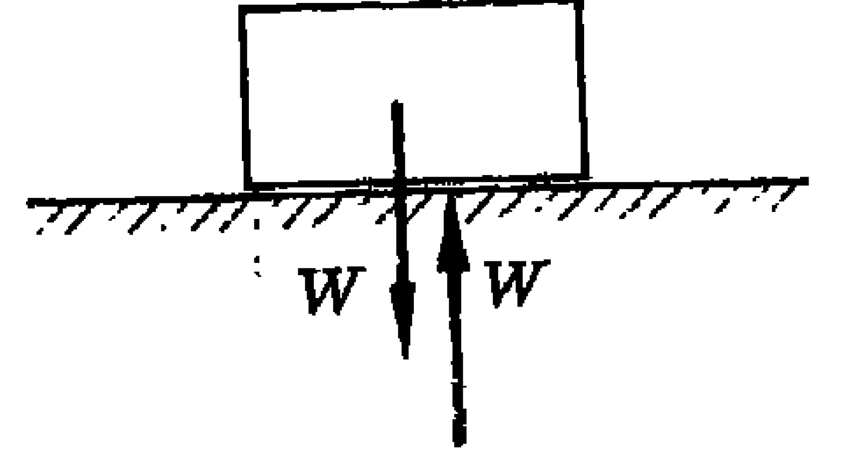
ولكن وزن الجسم على الأرض هو جذب الأرض له ، أى أن :

$$W_{\text{earth}} = G\frac{mM_{\text{earth}}}{R^2_{\text{earth}}}$$

وبمقارنة هاتين المعادلتين نجد أن :

$$\frac{W_{\text{moon}}}{W_{\text{earth}}} \approx 0.168 \approx \tfrac{1}{6}$$

أى أن وزن الجسم على القمر يساوى حوالى سدس وزنه على الأرض فقط . لايجاد تسارع السقوط الذاتى على القمر تستخدم ببساطة العلاقة $F = ma$ ، حيث F هى الآن وزن الجسم بينما a هو تسارع الجاذبية .



شكل (٤ - ٣)
حيث أن القالب فى حالة توازن فان جذب الجاذبية الأرضية له الى أسفل لابد أن يتزن مع دفع الأرضية الى أعلى .

اذن :

$$W_{\text{moon}} = mg_{\text{moon}}$$

بينما :

$$W_{\text{earth}} = mg_{\text{earth}}$$

وبقسمة المعادلة الأولى على الثانية نحصل على :

$$\frac{g_{\text{moon}}}{g_{\text{earth}}} = \frac{W_{\text{moon}}}{W_{\text{earth}}} \approx \tfrac{1}{6}$$

أى أن :

$$g_{\text{moon}} \approx \frac{g_{\text{earth}}}{6} = 1.6 \text{ m/s}^2$$

٤ - ٢ الحركة على مستوى مائل

اذا وجدت كتلة مادية فى حالة سكون على أرض مستوية فانها ستظل ساكنة مالم يدفعها شخص ما . وعدم تحرك الكتلة لايعنى عدم وجود قوى مؤثرة عليها ، فنحن نعلم أن الجاذبية الأرضية تجذبها الى اسفل . ومع ذلك فالكتلة متزنة لأن دفع الأرض لها الى أعلى يتزن مع جذب الجاذبية الأرضية ، وهذا موضح فى شكل ٤ - ٣ . ويعتبر تطبيق القانون $F = ma$ على هذه الحالة غير ذى معنى لأن القوة غير المتزنة F تساوى صفرا ، وعليه فان a تساوى صفرا كذلك .

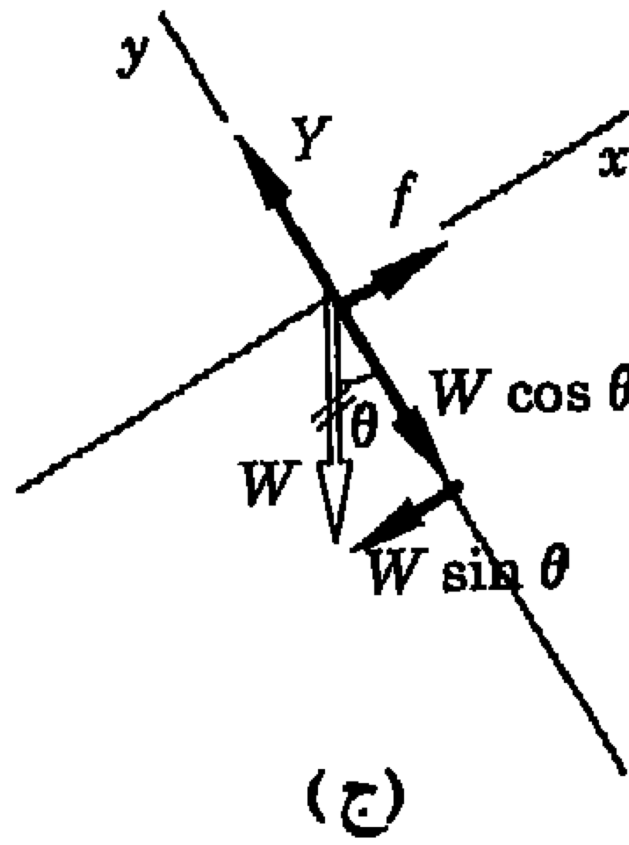
مثال توضيحى ٤ - ٣ : لندرس الآن حالة قالب موضوع على مستوى مائل،وهى الحالة المبينة فى شكل ٤ - ٤ أ . ماهى القوى التى تؤثر على القالب ؟

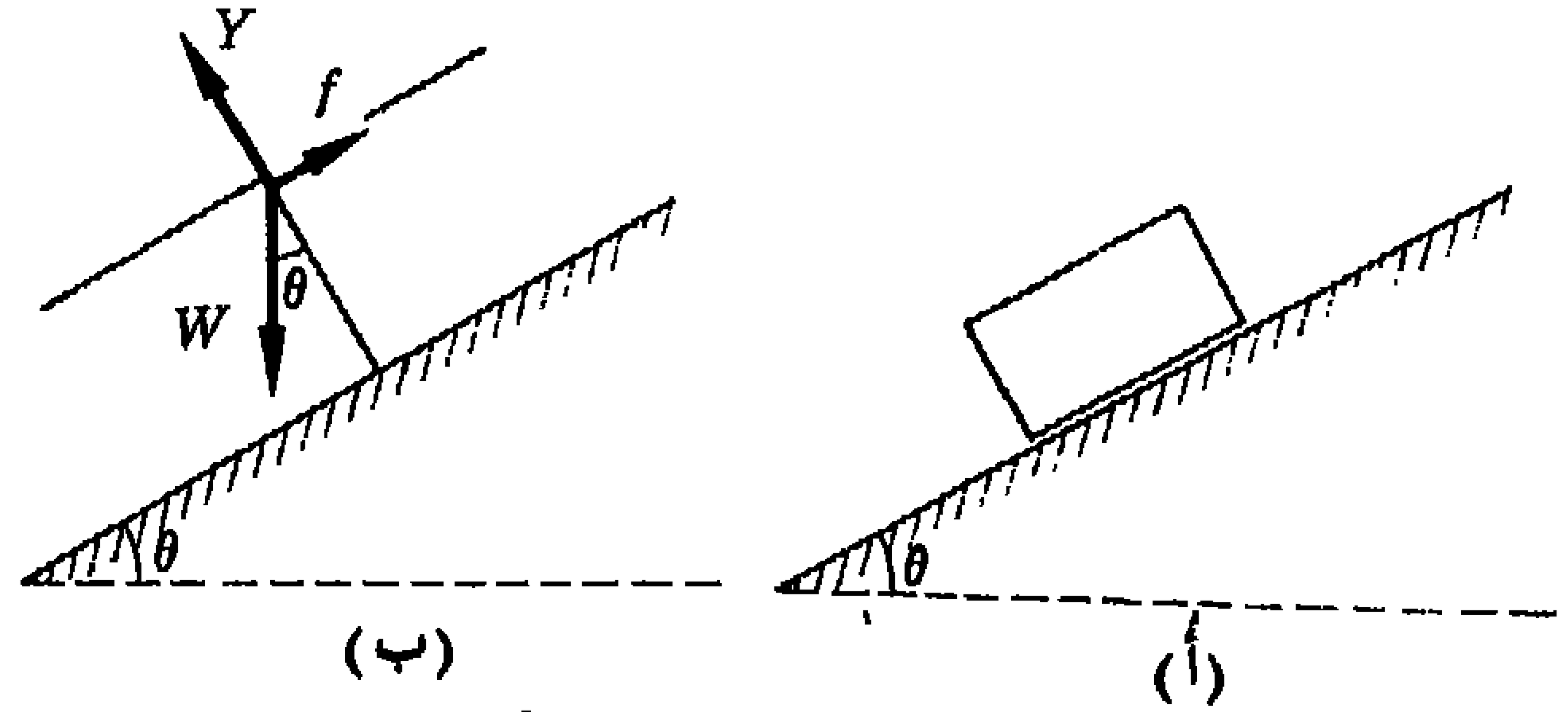
طريقة الحل : نعلم مما سبق أن الجاذبية الأرضية تجذب الجسم رأسيا الى أسفل بقوة قدرها W . أما القوة المؤثرة عند السطح المائل فانها الآن أكثر تعقيدا بعض الشيء . من المعتاد ومن المناسب اعتبارا أن القوة التى يؤثر بها المستوى المائل على القالب تتكون من جزءين . الجزء الأول ، وهو الدفع المتجه عموديا على سطح المستوى

المائل ، موضح بالمتجه **Y** فى رسم بيان الجسم الحر فى شكل ٤ – ٤ ب ، ويلاحظ أن هذه القوة قد سميت **بالقوة العمودية** فى الجزء ٣ – ٨ . بالاضافة الى ذلك هناك أيضا قوة الاحتكاك المؤثرة عند السطح المستوى المائل والتى تدفع القالب بحيث تمنعه من الانزلاق إلى أسفل على المستوى المائل ، وهذه القوة موضحة بالمتجه **f** فى رسم بيان الجسم الحر .

من الواضح أنه اذا تحرك الجسم ، أى اذا كانت قوة الاحتكاك صغيرة جدا بحيث لايمكنها أن تمنع القالب من الانزلاق ، فانه سوف يتحرك على المستوى المائل الى أسفل فى اتجاه مواز لسطحه . وحيث أن الحركة تتم فى موازاة المستوى المائل ، فمن المناسب أن نأخذ المحورين x و y فى اتجاه مواز للمستوى المائل ومتعامد معه على الترتيب ، كما هو مبين فى شكل ٤ – ٤ جـ . (فى البداية وحتى تعتاد على المحاور المائلة يمكنك ادارة الصفحة بحيث يأخذ المحور x اتجاها افقيا) . يلاحظ أن **Y** و **f** متجهان بالفعل فى الاتجاهين الصحيحين ، ولكن **W** فقط هى التى تحتاج الى تحليلها الى مركبتين وهما موضحتان فى الشكل .

والآن ، حيث أننا نعلم أن القالب لن يخترق المستوى المائل أو يطفو فوقه فلن تحدث حركة فى الاتجاه y وعليه فإن مجموع القوى فى الاتجاه y لابد أن يساوى صفرا . وهذا يعنى أن (انظر شكل ٤ – ٤ جـ) .





شكل (٤ – ٤)
عند التعامل مع جسم موضوع فوق مستوى مائل من المناسب أن يؤخذ المحوران x و y فى اتجاه مواز للمستوى المائل ومتعامد معه على الترتيب كما هو مبين . عندئذ تحلل القوى الى مركبات موازية لهذين المحورين .

$$Y - W\cos\theta = 0 \qquad (٤ - ٤)$$

واذا كان الاحتكاك كافيا لأن يحفظ القالب فى مكانه فان مجموع القوى فى الاتجاه x لابد أن يساوى صفرا كذلك . عندئذ نجد أن :

$$W\sin\theta - f = 0 \qquad (٥ - ٤)$$

أما اذا كانت قوة الاحتكاك صغيرة بحيث لاتستطيع أن تمنع القالب من الانزلاق فان القالب سيقع تحت تأثير قوة غير متزنة معينة ، وتعطى هذه القوة بالعلاقة :

$$F = W \sin\theta - f \qquad (٤ - ٦)$$

هذه القوة غير المتزنة ستسبب تسارع القالب . ومن قانون نيوتن نعلم أن :

$$F = ma$$

ومنه :

$$W \sin\theta - f = ma \qquad (٤ - ٧)$$

ومن ثم يمكننا حساب تسارع القالب .

من المهم أن نلاحظ أن $W = mg$ ، وعليه فان معادلةالتسارع (٤ - ٧) تتحول الى الصورة :

$$mg \sin\theta - f = ma$$

واذا كان الاحتكاك مساويا للصفر فان $f = 0$ ، منه :

$$a = g \sin\theta \qquad \text{بدون احتكاك} \qquad (٤ - ٨)$$

من هذا يتضح أن تسارع الجسم على المستوى المائل لايعتمد على طبيعة هذا الجسم بشرط عدم وجود احتكاك . وهذا يعنى أن عربة الأطفال ستتحرك الى أسفل على سفح التل بنفس تسارع السيارة اذا كانت قوى الاحتكاك مهملة .

فى الحالة الحدية ، عندما تكون $\theta = 0$ ، والأرض مستوية تبين لنا المعادلة (٤ - ٨) أن التسارع يساوى صفرا ، لأن $\sin\theta = 0$. وهذا بالطبع صحيح . من ناحية أخرى ، اذا كانت $\theta = 90°$ ، أى اذا كان المستوى المائل رأسيا ، فان القالب سوف يسقط رأسيا الى أسفل وان لم يكن هناك احتكاك فان الجسم سوف يسقط بتسارع الجاذبية g . المعادلة (٤ - ٨) صحيحة أيضا فى هذه الحالة لأنه اذا كانت $\theta = 90°$ فان $\sin\theta = 1$ وبالتالى فان المعادلة (٤ - ٨) تتحول الى $a = g$.

وعند هذه النقطة يجدر بنا أن ننبهك الى أنه ليس من الضرورى عادة أن تحفظ معظم المعادلات المذكورة آنفا عن ظهر قلب .. ربما كانت المعادلة (٤ - ٨) هامة بدرجة كافية لأن تحفظها عن ظهر قلب ، ولكن المعادلات الأخرى يمكن استنباطها بسهولة فى أية حالة معينة . بالاضافة الى ذلك قد تؤثر على الجسم قوى أخرى كما يحدث فى كثير من المواقف ، وعليه فان المسألة يجب أن تحل من البداية . وسنرى فيما بعد أن هذا ليس صعبا على الاطلاق .

مثال توضيحى ٤ - ٤ : لندرس الموقف الآتى . يبدأ طفل فى عربة الحركة من السكون من قمة تل ارتفاعه 20 ft وطوله 100 ft كما هو مبين فى شكل ٤ - ٥ . (١) ماهو تسارع العربة ؟ (٢) ماهى سرعة العربة عند قاعدة التل ؟ (افترض أن قوى الاحتكاك مهملة) .

طريقة الحل : لكى نجيب على هذه الاسئلة لندرس رسم بيان الجسم الحر المبين فى الجزء ب من الشكل . لابد أن تتزن Y مع $W \cos \theta$، ومن ثم فان القوة غير المتزنة الوحيدة تؤثر فى الاتجاه x وتساوى $W \sin \theta$. وباستخدام قانون نيوتن ، $F = ma$ ، ونجد أن :

$$W \sin \theta = ma$$
$$mg \sin \theta = ma$$

او :

$$a = g \sin \theta$$

لايجاد $\sin \theta$ نتذكر أن تعريف الجيب هو طول الضلع المقابل مقسوما على طول الوتر . وباستخدام المثلث الذى يكونه المستوى المائل نجد من شكل ٤ – ٥ أ أن :

$$\sin \theta = \frac{20 \text{ ft}}{100 \text{ ft}} = 0.20$$

وحيث أن $g = 32 \text{ ft/s}^2$ فان التسارع سيصبح :

$$a = (32 \text{ ft/s}^2)(0.20) = 6.4 \text{ ft/s}^2$$

أى أن حركة الطفل منتظمة التسارع ، وعليه فان معادلات الحركة المذكورة فى الفصل الثانى تنطبق على هذه المسألة . المعطيات هى :

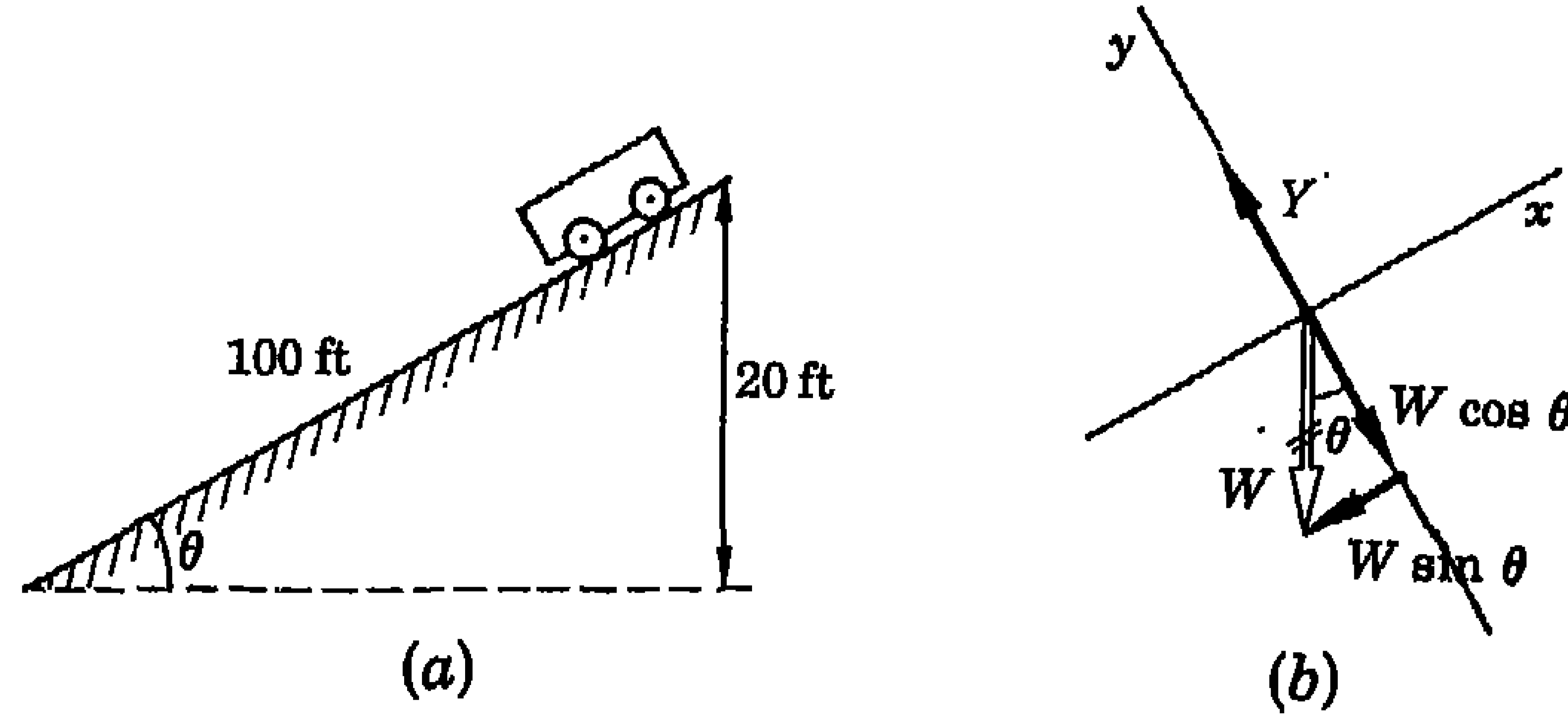
$$v_0 = 0 \qquad a = 6.4 \text{ ft/s}^2$$
$$s = 100 \text{ ft} \qquad v_f = ?$$

المعادلة المناسبة هى :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$
$$v_f^2 = (2)(6.4 \text{ ft/s}^2)(100 \text{ ft})$$
$$v_f = 10\sqrt{12.8} = 36 \text{ ft/s}$$

لاحظ أننا لم نحتاج الى معرفة وزن الطفل والعربة لكى نحل هذه المسألة أما اذا كنا قد افترضنا وجود قوة الاحتكاك فلم يكن ممكنا اختزال الكتلة .

مثال توضيحى ٤ – ٥ : تستطيع سيارة معينة كتلتها 1200 kg أن تتسارع بمعدل 0.50 m/s الى أعلى فوق مستوى مائل يرتفع بمعدل 4.0 m لكل 40 m . ماهى القوة التى يجب أن تؤثر على السيارة والتى تدفعها أثناء صعودها على المستوى المائل باهمال الاحتكاك ؟



شكل (٤ – ٥)
تسبب مركبة الوزن الموازية للمستوى المائل تسارع العربة (بدون مقياس رسم) .

طريقة الحل : ارجع الى شكل ٤ – ٦ أ ، ب . القوة المطلوبة هى القوة P التى تدفع السيارة الى أعلى فوق المستوى المائل . من الواضح أن القوة غير المتزنة فى الاتجاه x هى $P - W\sin\theta$ وحيث أن $m = 1200$ kg ، $W = mg$ ، فان قانون نيوتن يمكن وضعه على الصورة :

$$F = ma$$
$$P - W\sin\theta = ma$$

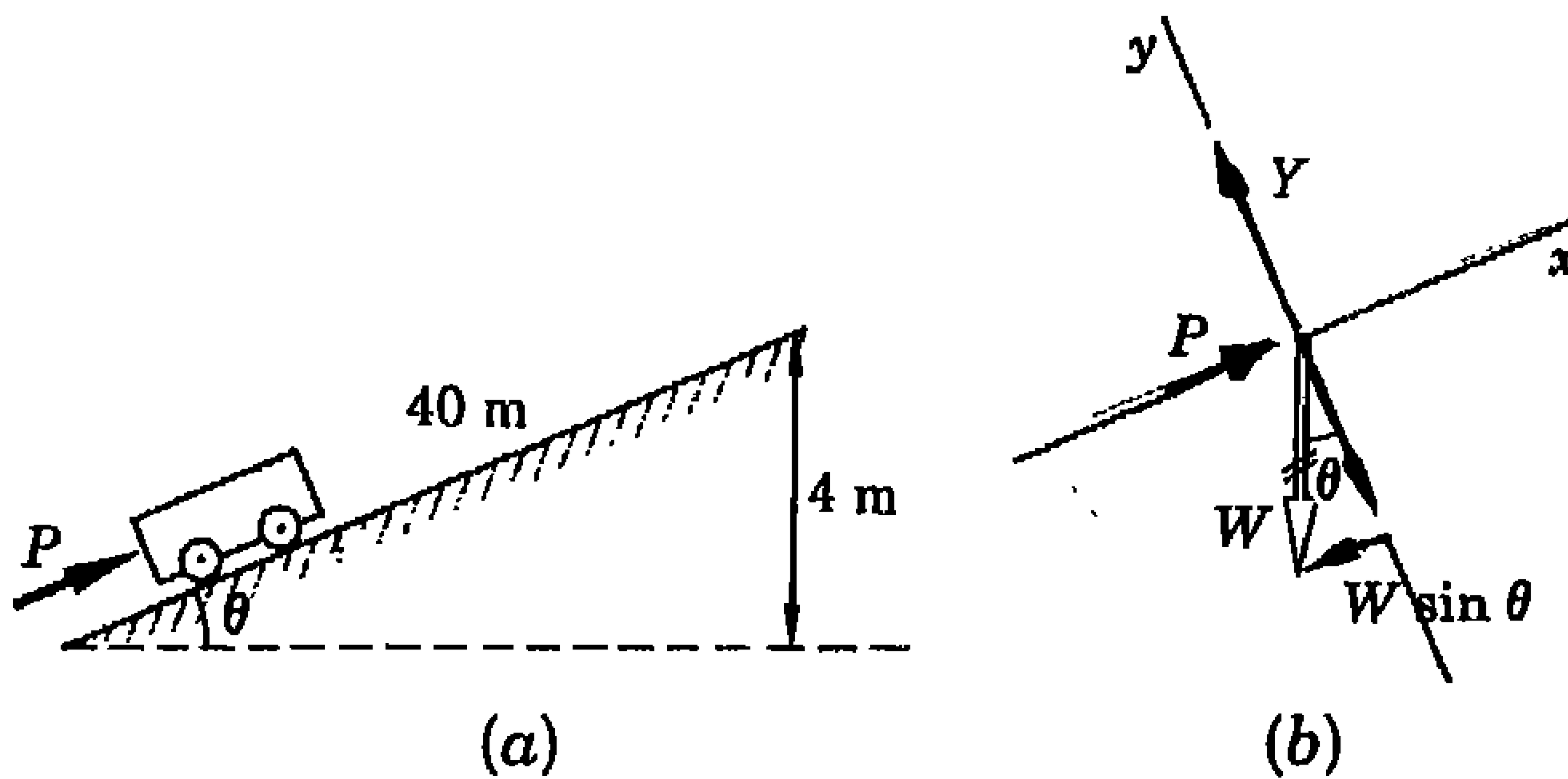
أو :

$$P - (1200 \times 9.8)\left(\frac{4.0}{40}\right) = (1200\ \text{kg})(0.50\ \text{m/s}^2)$$

ومنه :

$$P = 1780\ N$$

هل يمكنك أن تصف كيف توفر العجلات هذه القوة للسيارة ؟



شكل (٤ – ٦)
تتزن القوة P جزئيا مع مركبة الوزن المؤثرة الى أسفل فى اتجاه مواز للمستوى المائل . ينشأ الى أعلى فى الاتجاه الموازى للمستوى المائل كنتيجة للجزء غير المتزن من P

مثال توضيحى ٤ – ٦ : يراد سحب قالب كتلته 50 kg الى أعلى على مستوى مائل باستخدام موتور كما هو موضح فى شكل ٤ – ٧ ، وكان معامل الاحتكاك بين القالب والمستوى المائل 0.70 . ماهو الشد فى الحبل اذا كان القالب يتحرك بسرعة ثابتة ؟

طريقة الحل : لاحظ هنا أن التسارع يساوى صفرا ، وبناء على ذلك فان القوة غير المتزنة المؤثرة على القالب تساوى صفرا وعليه فان القالب فى حالة توازن (يتحرك بسرعة ثابتة) . وحيث أن مجموع القوى فى الاتجاه x يساوى صفرا ، يمكننا بالاستعانة بالشكل ٤ – ٧ ب أن نكتب العلاقة التالية :

$$T - f - W\sin\theta = 0$$

وحيث أن $W = mg$ فان :

$$T = f + (50 \times 9.8\ \text{N})(\tfrac{6}{10})$$

ولكن قوة الاحتكاك تعطى بالعلاقة $f = \mu Y$ وايضا حيث القوى فى الاتجاه y لابد أن تكون متزنة $Y = W\cos\theta$ فان :

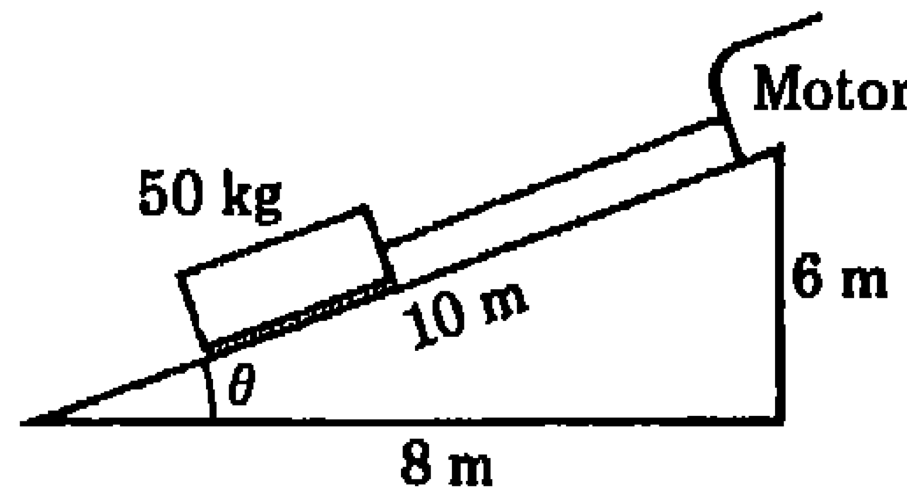
$$f = (0.70)(50 \times 9.8\ \text{N})(\tfrac{8}{10})$$

وبالتعويض عن هذه القيمة نحصل على $T \approx 570\ \text{N}$.

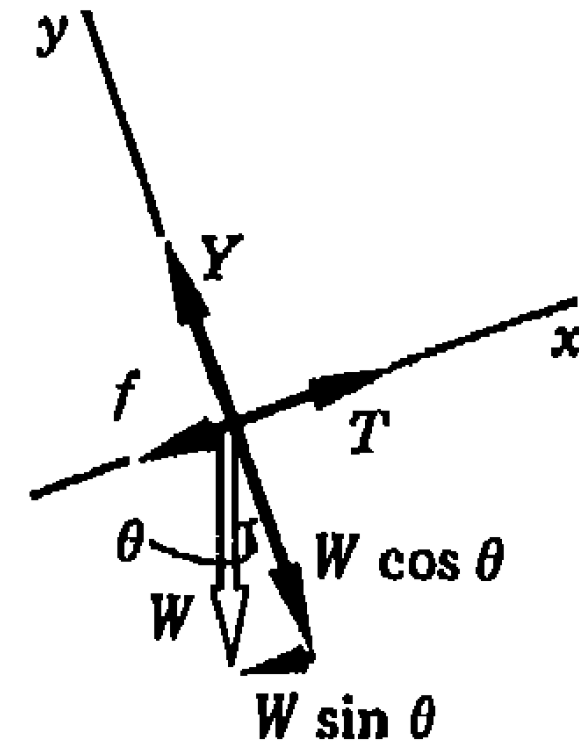
مثال توضيحى ٤ – ٧ : أوجد تسارع المجموعة الموضحة فى شكل ٤ – ٨ أ . قوة الاحتكاك المؤثرة على القالب الذى كتلته 5 kg هى 20 N .

طريقة الحل : كما فعلنا فى الأمثلة المشابهة فى الفصل الأخير يعزل كل جسم ثم نكتب العلاقة $F = ma$ لكل من الجسمين على حدة ، ثم يرسم رسم بيان الجسم الحر كما هو مبين فى الجزئين ب و جـ من الشكل ٤ – ٨ . وعند وجود قوى الاحتكاك من الضرورى أن نعرف اتجاه الحركة لأن f يجب أن تكون فى عكس اتجاه الحركة . وفى هذه الحالة يمكننا أن نقول أن الجسم الذى كتلته 7 kg سوف يسقط . وبأخذ اتجاه الحركة كاتجاه موجب وتطبيق القانون $F = ma$ على الجسمين نحصل علي المعادلتين الآتيتين :

$$(7 \times 9.8) - T = 7a$$
$$T - 29.4 - 20 = 5a$$



(أ)



(ب)

شكل (٤ – ٧)
حيث أن القالب يجب أن يتحرك الى أعلى فوق المستوى المائل بسرعة ثابتة فان الجذب الناتج من الموتور يجب أن يتزن تماما مع مجموع قوة الاحتكاك ومركبة الوزن المؤثرة الى أسفل المستوى المائل .

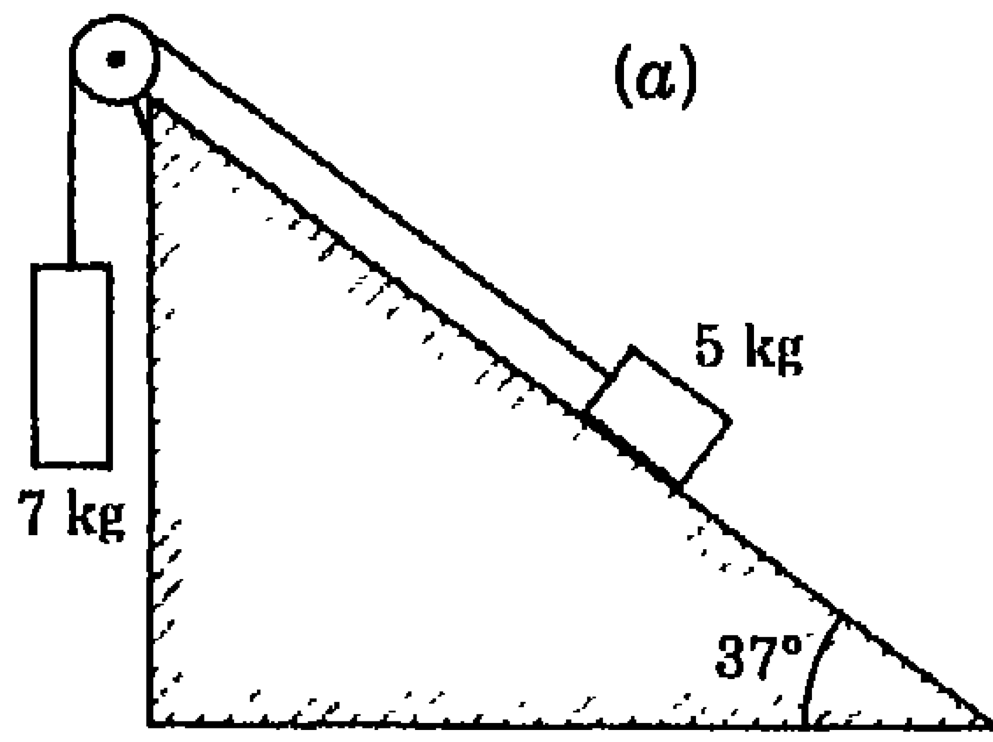
وبجمع هاتين المعادلتين نحصل على :

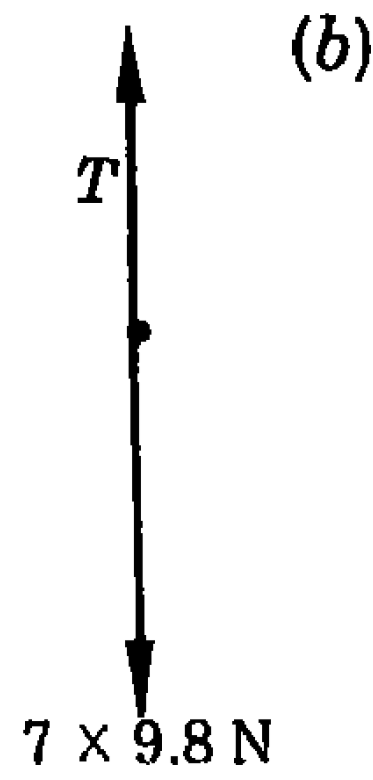
$$19.2 = 12a$$
$$a = 1.6\ \text{m/s}^2$$

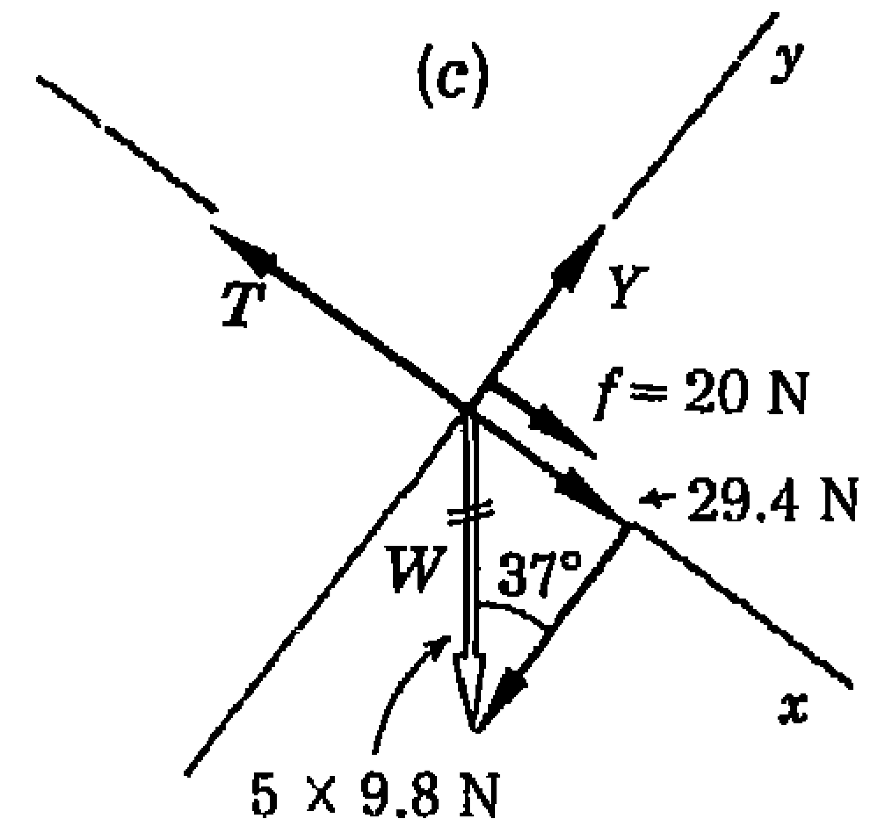
يجب عليك الآن التعويض بالوحدات فى المعادلات السابقة واثبات أن وحدات a المذكورة صحيحة .

يمكن ايجاد الشد بالتعويض فى المعادلة الثانية لتجد أن :

$$T = 49.4 + 8.0 = 57.4\ \text{N}$$







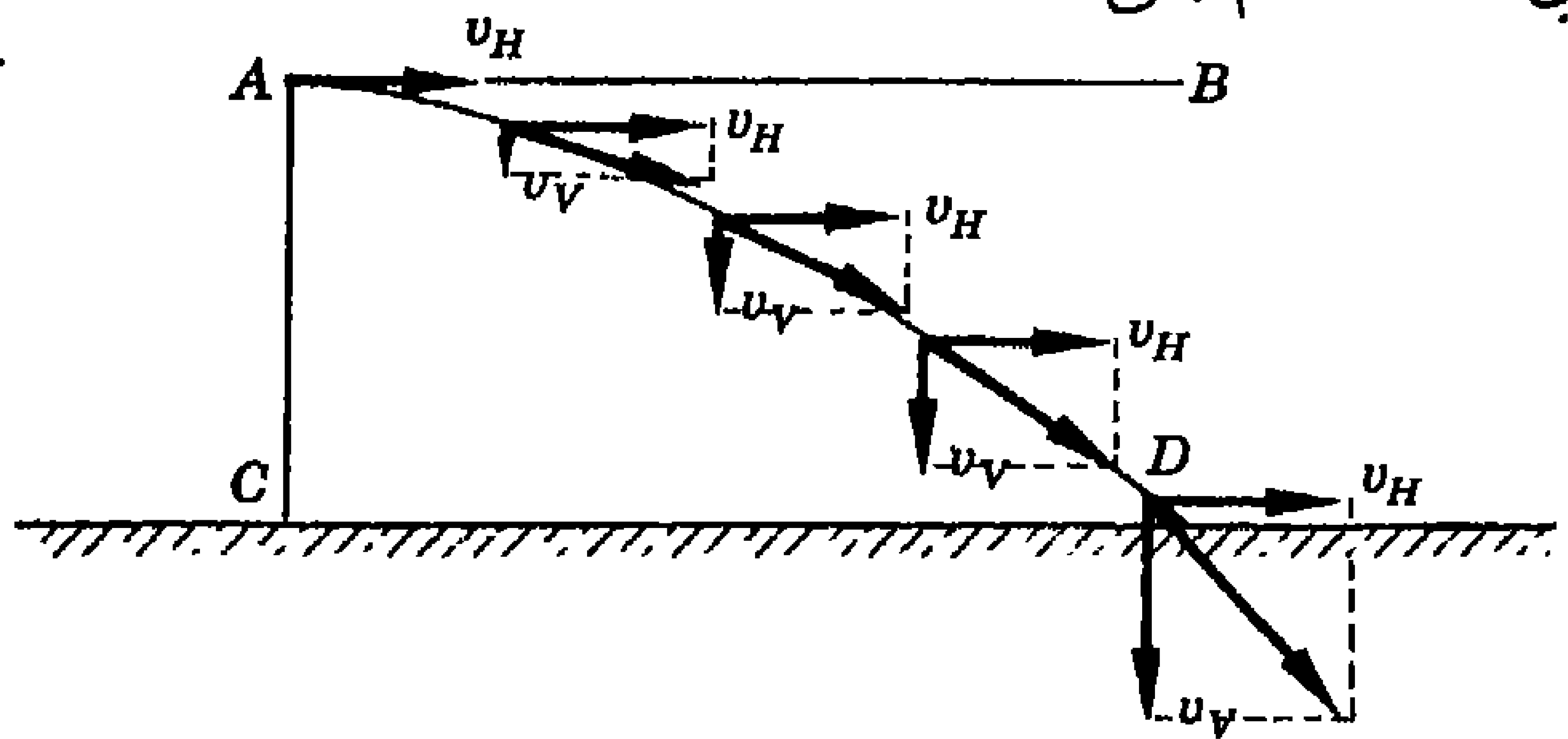
شكل (٤ – ٨)
الجسم الذى كتلته 7 kg يسقط رأسيا الى أسفل جاذبا الثقل الآخر الى أعلى على المستوى المائل . الشكلان (ب) و (حـ) يمثلان رسمى بيان الجسم الحر للثقلين .

٤ – ٣ حركة المقذوفات

فى هذا الجزء سندرس جسم يسقط سقوط طليقا عندما يكون لسرعته مركبة موازية لسطح الأرض . ويجدر بنا أن نوضح أن السقوط الذاتى للاجسام التى درسناها فى الفصل الثانى هو حالة خاصة من الحركة التى سندرسها الآن ، ففى ذلك الفصل عالجنا حالة الجسم الذى يتحرك فى الاتجاه الرأسى فقط ، ولكن هذه الحركة ليست الحالة العامة .

فمثلا عندما يقذف لاعب سسبول (baseball) الكرة الى زميله فانها تفعل شيئين بمجرد أن تترك يد اللاعب . حيث أن الأرض تؤثر على الكرة بقوة تجذبها الى أسفل فانها سوف تتسارع الى أسفل تحت تأثير هذه القوة غير المتزنة . ومع ذلك فان الكرة سوف تتحرك افقيا فى نفس الوقت بسرعة ثابتة معينة . يمكننا فهم ذلك بالاستعانة بالشكل ٤ –٩ .

لنفرض أن الكرة تترك يد الرامى عند النقطة A وأن سرعتها فى تلك اللحظة متجهة بأكملها فى الاتجاه الأفقى . لنرمز الى سرعة الكرة فى تلك اللحظة بالرمز v_H . طبقاً لقانون نيوتن لن يكون للكرة أى تسارع فى الاتجاه الأفقى مالم تؤثر عليها قوة متجهة افقيا . ولكن اذا أهملنا الاحتكاك مع الهواء فان القوة الوحيدة التى ستؤثر على الكرة بمجرد أن تتحرر من يد القاذف هى قوة الجاذبية ، ولن تكون هناك أية قوة أفقية مؤثرة على الكرة . لذلك فان السرعة الأفقية ستظل ثابتة ومساوية للسرعة الأفقية الابتدائية v_H الى أن تصطدم بشيء ما .



شكل (٤ – ٩)
السرعة الأفقية الابتدائية للكرة v_H لاتتغير . وعندما تتحرك الكرة بهذه السرعة الى اليمين فانها تسقط أيضا تحت تأثير الجاذبية الأرضية كما هو موضح بالمتجهات التى تمثل المركبة الرأسية للسرعة . لاحـــظ أن $v = \sqrt{v_H^2 + v_V^2}$ وأنها مماسة لمسار المقذوف .



صورة بالأشعة السينية لخفاش تم التقاطها باستخدام الجهاز الموضح فى شكل ٢٧ - ١٥ ب (هيلويت - باكارد)

اكتشاف الأشعة السينية

اكتشفت كثير من قوانين الفيزياء بتفسير نتائج التجارب المصممة بعناية لتعيين هذه القوانين . وينطبق هذا على اكتشاف جاليليو لقانون الاجسام الساقطة ، كما تنتمى قوانين نيوتن أيضا الى نفس هذا النوع العام . ومع ذلك فان بعض الظروف المعملية الدقيقة وغير المتوقعة تؤدى أحيانا إلى اكتشاف ظاهرة هامة فى الفيزياء . وهذا هو ماحدث عندما اكتشف ويلهلم كونراد رونتجن (١٨٤٥ - ١٩٢٣) الأشعة السينية .

لاجراء تجارب التفريغ أو الشرر على الفلطية ، وضع رونتجن فرق جهد قدره بضعة آلاف من الفولطات بين قطبين كهربائيين موجودين فى نهايتى أنبوب مفرغ تفريغا جزئيا . وتحت هذه الظروف لاحظ رونتجن تكون تفريغ أو وهج يشبه كثيرا ذلك الوهج المشاهد فى اشارات النيون . ومع ذلك فاذا انقص ضغط الغاز فى الأنبوب بدرجة كافية فان الوهج يتوقف تقريبا . وعند اجراء التجارب باستعمال أنبوب مفرغ تفريغا عاليا فى معمله المظلم عام ١٨٩٥ لاحظ أن ستارا فلوريا قريبا (يشبه كثيرا الستار الموجود فى نهاية أنابيب التليفزيون الحالية) يتوهج أيضا فى الظلام . وبتحريك الستار فى الغرفة استطاع أن يثبت أن الضوء المنبعث من الستار الفلورى كان ناتجا من شيء مايحدث فى أنبوب التفريغ . وحيث أنه كان من الممكن وضع غطاء محكم ضوئيا على الأنبوب بدون أن يؤثر كثيرا على وهج الستار ، كان من الواضح أن الوهج الفلورى كان مسببا بشيء آخر غير الضوء المنبعث من أنبوب التفريغ . وقد سمى رونتجن هذا الاشعاع المجهول الذى يسقط على الستار والمنبعث من الأنبوب بالاشعة السينية .

أجرى رونتجن كثيرا من التجارب على الأشعة المنبعثة من أنبوب التفريغ ووجد أنها عالية النفاذية وتستطيع أن تنفذ حتى خلال كتاب سميك . كما وجد كذلك أن الفلزات الثقيلة والعظام (ضمن مواد أخرى) غير شفافه تقريبا لهذه الأشعة مثل بعض المواد كالخشب والورق . بالاضافة الى ذلك استطاع رونتجن أيضا تكوين الظلال باستخدام هذه الأشعة ، فقد تمكن من تكوين ظلال تبين عظام يد زوجته والخاتم الذى تضعه فى أصبعها . ونظرا لقدرة هذه الأشعة على تكوين الظلال ترك رونتجن الاحتمال مفتوحا لأن تكون هذه الأشعة ضوءا ذا طول موجى قصير . ومع ذلك فقد كان ممانعا لأن يقرر ذلك كحقيقة لأن هذه الأشعة ، بعكس الضوء ، لاتنكسر انكسارا محسوسا عند مرورها من الهواء الى الماء .

وكما سنرى فى الفصول اللاحقة فان الأشعة السينية التى اكتشفها رونتجن تشبه بالفعل موجات الضوء ولكن طولها الموجى أقصر كثيرا . ولسوء الحظ فان الأشعة السينية ، كما نعلم الآن ، تدمر الأنسجة الآدمية وتسبب حروقا شديدة عند التعرض المفرط لها . وحتى اذا لم تحدث هذه الأشعة حروقا مرئية فان تدميرا آخر قد يكون موجودا . وقد عانى كثير من الباحثين الأوائل فى مجال الأشعة السينية تدهورا فى صحتهم ومات بعضهم بالفعل نتيجة لجهلهم للخواص الضارة لهذه الأشعة المفهومة قليلا .

ويجب أن يكون واضحا من ذلك أن الحركة الأفقية للكرة بسيطة للغاية ، فان الكرة تتحرك بسرعة ثابتة تساوى المركبة الأفقية للسرعة وهى v_H الى أن تصطدم بشيء ما . يمكننا اذن أن نكتب المعطيات التالية بالنسبة للحركة الأفقية (حيث أن السرعة الابتدائية v_0 تساوى السرعة النهائية v_f ومتوسط السرعة $\bar{v}$) :

للحركة الأفقية :

$$v_0 = v_f = \bar{v} = v_H$$
$$a = 0 \qquad s = \bar{v}t = v_H t$$

أما الحركة الرأسية للكرة فانها ليست معقدة كثيرا ، فان الكرة سوف تتسارع الى أسفل تحت تأثير قوة الجاذبية ، وعليه فان $a = g$. وهذه الحركة الرأسية هى تماما نفس الحركة التى ناقشناها فى الفصل الثانى بالنسبة للسقوط الذاتى للاجسام ، وعليه فان حل مسألة الحركة الرأسية ليس جديدا علينا ويمكننا بالتالى حلها بدون أية صعوبة .

تعتمد طريقتنا اذن على أن الحركة الحرة لكرة أو رصاصة أو أى مقذوف آخر تتكون من حركتين منفصلتين . الأولى هى الحركة الأفقية بسرعة ثابتة وهى مسألة بسيطة جدا . أما الحركة الثانية فهى الحركة الرأسية وهى تماثل تماما حركة السقوط الذاتى لجسم رأسيا فى خط مستقيم . وسنحسب كل جزء من مسألة حركة المقذوف على حدة ، ثم تدمج نتيجتا حل المسألتين المنفصلين للحصول على الاجابة المطلوبة . ويتم ذلك فى الحقيقة بحساب المركبتين الأفقية v_H والرأسية v_V لسرعة المقذوف ثم يوجد مقدار السرعة المحصلة باستخدام الطريقةالمعتادة لجمع المتجهات المتعامدة $v = \sqrt{v_H^2 + v_V^2}$ ويمكن توضيح هذه الطريقة بالمثال التالى .

مثال توضيحى ٤ – ٨ : لندرس الموقف الموضح فى شكل ٤ – ٩ . لنفرض أن الكرة تترك يد القاذف لتسير بسرعة أفقية قدرها 15 m/s ولنفرض أن ا الكــرة كانت على ارتفاع 2.0 m فوق سطح الأرض عند هذه اللحظة . فى أى مكان سوف تصطدم الكرة بالأرض ؟ (أى على أى بعد تقع النقطة D بالنسبة الى النقطة C فى شكل ٤ – ٩؟) .

طريقة الحل : نبدأ الحل بتقسيم المسألة الى قسمين :

وحيث أن زمن الطيران ، أى الزمن اللازم للسقوط على الأرض قد وجد من مسألة الحركة الرأسية ، فان هذه النتيجة يمكن استخدامها فى مسألة الحركة الأفقية . اذن :

$$s_H = (15\ \text{m/s})(0.64\ \text{s}) = 9.6\ \text{m}$$

مسألة الحركة الأفقية	مسألة الحركة الرأسية (الاتجاه الموجب الى أسفل)
$v_0 = v = \bar{v} = 15$ m/s	$v_0 = 0$
$s_H = \bar{v} = 15t$	$a = 9.8$ m/s^2
	$s_V = 2.0$ m
	To find t, we use
لايجاد t يجب حل المسألة الرأسية	$s_V = v_0t + \frac{1}{2}at^2$
	$2.0 = 4.9t^2$
	$t = 0.64$ s

وباسلوب آخر يمكننا القول أن الكرة تقطع مسافة 9.6 m فقط قبل أن يسبب جذب الجاذبية الأرضية سقوطها على الأرض . وفى الحقيقة فاننا نقذف الكرة عادة الى أعلى قليلا* اذا أردنا أن تقطع الكرة أية مسافة كبيرة . فاذا كان للكرة مركبة ابتدائية للسرعة متجهة الى أعلى فانها ستأخذ وقتا أطول للسقوط على الأرض وبالتالى سيكون لديها وقت أطول لكى تتحرك فى الاتجاه الأفقى .

مثال توضيحى ٤ – ٩ : قذفت كرة بسرعة ابتدائية قدرها 30 ft/s بزاوية قدرها 37° فوق الأفقى ، وتركت يد القاذف من ارتفاع قدره 40 ft فوق مستوى الأرض ومن بعد قدره 15 ft من حائط كما هو مبين فى شكل ٤ – ١٠ . (١) على أى ارتفاع من سطح الأرض ستصطدم الكرة بالحائط ؟ (٢) هل ستكون الكرة متحركة الى أعلى قبل الاصطدام مباشرة أو أنها ستكون متحركة فى طريقها الى أسفل ؟

طريقة الحل : لندرس رحلة الكرة من نقطة البداية الى الحائط . بالنسبة للجزء ١ :

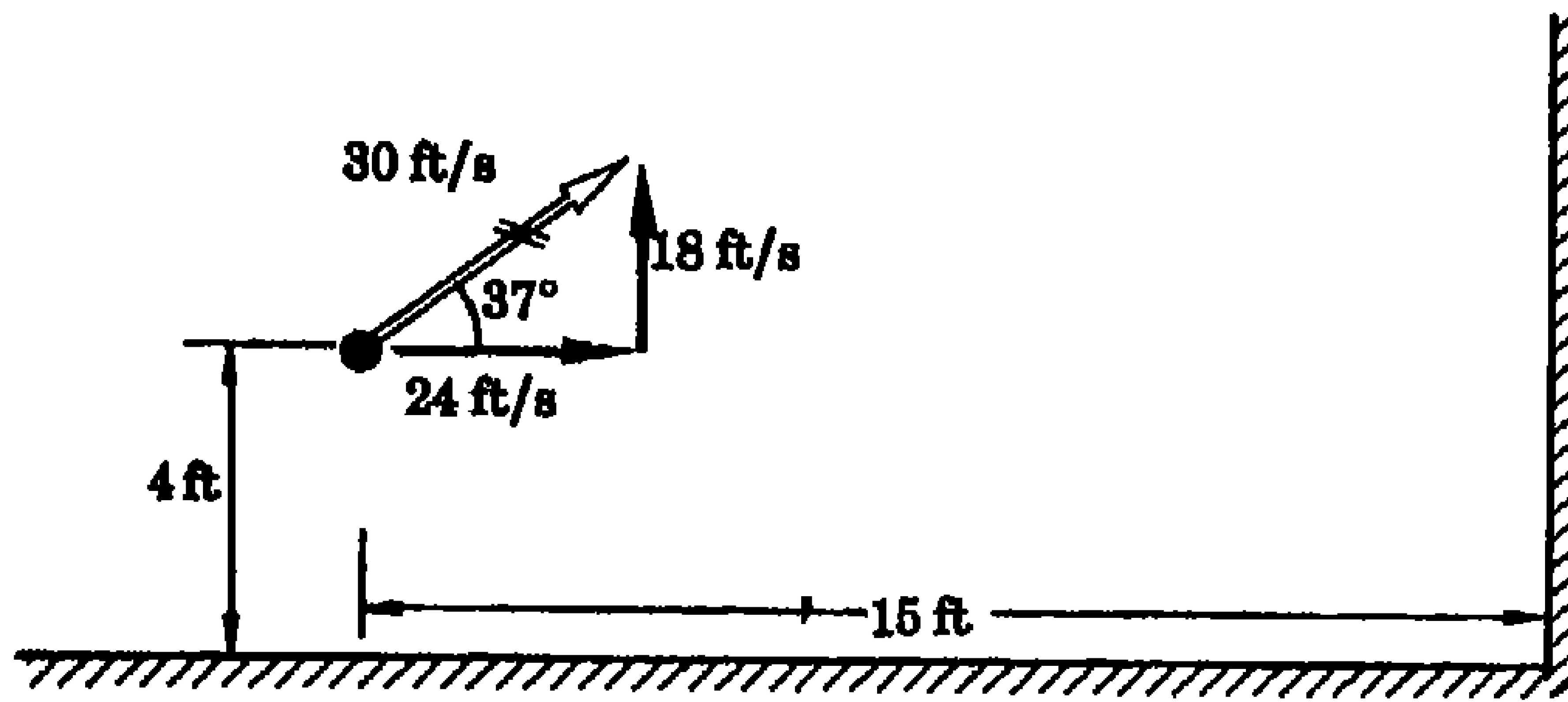
الجزء ٢ : لنستمر فى معالجة الجزء الرأسى من المسألة ونوجد المركبة الرأسية لسرعة الكرة قبل اصطدامها بالحائط مباشرة . لدينا :

$$v = v_0 + at = 18 - (32)(\tfrac{5}{8}) = 18 - 20 = -2 \text{ ft/s}$$

مسألة الحركة الأفقية	مسألة الحركة الرأسية (الاتجاه الموجب الى أعلى)
$v_0 = v = \bar{v} = 24$ ft/s	$v_0 = 18$ ft/s
$s = 15$ ft	$t = \frac{5}{8}$ s
$= \bar{v}t$	$a = -32$ ft/s^2
$15 = 24t$	$s = ?$
$t = \frac{5}{8}$ s	$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$
نستخدم الآن هذه النتيجة فى مسألة	$= (18)(\frac{5}{8}) - (16)(\frac{5}{8})^2$
	$= 11.2 - 6.2$
الحركة الرأسية .	$= 5.0$ ft فوق نقطة البداية

وحيث أننا قد اخترنا الاتجاه الى أعلى كاتجاه موجب ، فان السرعة السالبة تعنى سرعة الى أسفل . وعليه فان الكرة تكون فى طريقها الى أسفل عند الاصطدام .

* ولكن ليس بزاوية 45° من الأفقى . لماذا ؟



شكل (٤ – ١٠)
في أى مكان تصطدم الكرة بالحائط ؟ هل ستكون متحركة الى أعلى عند لحظة الاصطدام ، أو أنها ستكون في طريقها الى أسفل ؟

السرعة الكلية للكرة قبل الاصطدام مباشرة تتكون من المركبة الرأسية الى أسفل وهى 2 ft/s والمركبة الأفقية 24 ft/s لايجاد مقدار السرعة عند هذه النقطة يمكن جمع هاتين المركبتين بالطريقة المعتادة . سنجد عندئذ أن مقدار السرعة الكلية هو $\sqrt{(24)^2 + 2^2}$ ft/s

ملخص :

كل قطعة من الكتلة فى الكون تجذب كل القطع الأخرى من الكتلة . اذا كانت كتلتا كرتين منفصلتين هما m_2, m_1 فان القوة الجاذبة التى تؤثر بها كل منهما على الأخرى تعطى بقانون نيوتن للجاذبية :

$$F = G\left(\frac{m_1 m_2}{r^2}\right)$$

حيث G ثابت من ثوابت الطبيعة ويساوى 6.67×10^{11} N. m²/kg² و r هى المسافة بين مركزى الكرتين . تنطبق هذه العلاقة أيضا على الكتل غير الكروية التى تعتبر صغيرة بالمقارنة بمسافة الانفصال r .

يمكن ايجاد تسارع الجاذبية g من العلاقة $F = ma$ من قانون نيوتن للجاذبية . بفرض أن الأرض عبارة عن كرة فان كتلة خارج الأرض تقع على مسافة r من مركز الأرض سوف تسقط بتسارع قدره $g = GM_{earth}/r^2$، حيث M_{earth} كتلة الأرض . ينطبق تعبير مشابه على السقوط الذاتى على القمر وذلك باستبدال M_{earth} بكتلة القمر وجد أن g_{moon}، تساوى حوالى سدس قيمة g_{earth} .

عند دراسة الحركة على مستوى مائل يعالج الموقف بدلالة مركبات الحركة . يؤخذ المحور x موازيا لسطح المستوى المائل بينما يؤخذ المحور y عموديا على السطح المائل .

تحلل حركة المقذوف ، بدون احتكاك ، بدلالة مركبات الحركة . التسارع يساوى صفرا بالنسبة للحركة الافقية الموازية لسطح الأرض . كنتيجة لذلك نجد أن $v_0 = v_f = v_H$ وتؤول معادلات الحركة الخمس الى المعادلة $s = v_H t$. تعالج المركبة الرأسية للحركة معالجة مستقلة بنفس الطريقة التى تستخدم عند غياب الحركة الأفقية .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – كتابة المعادلة التى تعبر عن قانون نيوتن للجاذبية . شرح كل رمز بالاستعانة بالرسم البيانى . ذكر شروط تطبيق المعادلة .

٢ – ايجاد قوة الجذب التى تؤثر بها كرة على اخرى بمعلومية m_1 ، m_2 ، r ، G ،تكرار ذلك فى حالة كتلتين صغيرتين (كتلتين نقطيتين) بأى شكل بشرط أن تكون r أكبر كثيرا من أبعاد النقطتين .

٣ – حساب تسارع الجاذبية لأى كوكب كبير بشرط معرفة كتلة الكوكب ونصف قطره . افترض أيضا أن G معلومة .

٤ – تحليل القوى المؤثرة على جسم موضوع على مستوى مائل الى مركبتين احداهما موازية لسطح المستوى المائل والأخرى متعامدة معه . توضيح أى مركبة من مركبات القوة (القوى) هى التى تسبب انزلاق الجسم الى أسفل على المستوى المائل .

٥ – ايجاد قوة الاحتكاك التى تعوق حركة جسم على مستوى مائل بمعلومية θ ، μ ، m . تكرار ذلك فى حالة ما اذا كانت قوة معلومة مؤثرة على الجسم تعوق أو تساعد الحركة .

٦ – حساب تسارع جسم يتحرك الى أعلى أو الى أسفل على مستوى مائل عندما تكون القوى المؤثرة على الجسم معلومة . وبالمثل ، ايجاد القوى المجهولة اذا كان التسارع وجميع القوى المؤثرة على الجسم معلومة عدا واحدة .

٧ – تحليل حركة المجموعات المشابهة لتلك المجموعة الموضحة فى المثال التوضيحى ٤ – ٧ .

٨ – ايجاد المسافة الافقية التى يقطعها مقذوف طلق بزاوية معلومة وسرعة معلومة من ارتفاع معين من سطح الأرض .

٩ – حساب ارتفاع نقطة اصطدام مقذوف بحائط بعيد اذا كانت السرعة الابتدائية وموضع المقذوف الابتدائى معلومين .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

قانون الجاذبية العام لنيوتن

يمكن استخدام قانون الجاذبية لاشتقاق نتائج جاليليو المتعلقة بتسارع الجاذبية g .

أخذ مركبتى وزن جسم ما فى الاتجاه الموازى لسطح مستوى مائل والاتجاه العمودى عليه .

تتكون حركة المقذوف من حركتين منفصلتين تحدثان آنيا فى الحركة الأفقية لمقذوف :

$$\bar{v} = v_0 = v_f \quad \text{و} \quad : \quad a = 0$$

أسئلة وتخمينات

١ – يقترح أن مستعمرة فضائية قد تكونت على أحد الكويكبات السيارة فى نظامنا الشمسى . ومن المعروف أن كتل هذه الكويكبات تمثل فقط كسرا صغيرا من كتلة القمر . كيف يمكن أن تتغير حياة سكان هذه المستعمرة بسبب تأثيرات الجاذبية ؟

٢ – لنفرض أن الحجم الهندسى للشمس هو حجمها الحالى ولكن كتلتها أكبر مائة مرة من كتلتها الحالية . ولاسباب سنذكرها فى الفصول القادمة يجب أن يتغير جوها عن جونا حاليا ، ولكن يمكنك أن تفترض فى هذه المناقشة أن الجو لايختلف عن جونا وأن هناك مخلوقات أدمية صغيرة موجودة عليها . كيف يمكن أن تختلف أجسام هذه المخلوقات عن أجسامنا نحن ؟

٣ – عندما تركل بحذائك كوما من التراب الجاف الدقيق فان التراب يتطاير فى جميع الاتجاهات . اشرح لماذا يكون هذا العمل أكثر اثارة على القمر عنه على الأرض .

٤ – يقوم المتحمسون للطائرات احيانا ببعض الحركات لاظهار مهاراتهم . واحدى هذه الحركات هى اسقاط كيس ملىء بالرمل فى مركز دائرة على الأرض بالضبط أثناء طيرانهم على ارتفاع معين وبسرعة معينة . ماهى الصعوبة فى ذلك ؟ ألا يمكنهم اسقاط الكيس عندما يكونون فوق الدائرة مباشرة ؟

٥ – يجب أن يكون الوالدان مستعدان لأى شىء تقريبا . لنفرض أن طفلا صغيرا يريد أن يعرف بأى سرعة يمكن للمقلاع أن يقذف حجرا . ابتكر طريقة لمعرفة ذلك بفرض أن لديك مسطرة فقط .

٦ – اذا أردت أن تصيب جسما ساكنا بعيدا ببندقية فانك لاتوجه البندقية بحيث يقع الجسم على خط مستقيم واحد مع فتحة ماسورة البندقية . كيف توجه البندقية ؟

٧ – الى أى ارتفاع يمكنك أن تقذف كرة بيسبول على القمر ؟ والى أى ارتفاع تقريبا يمكنك أن تقفز ؟ والى أية مسافة تقريبا يمكنك أن تقذف ربع دولار ؟

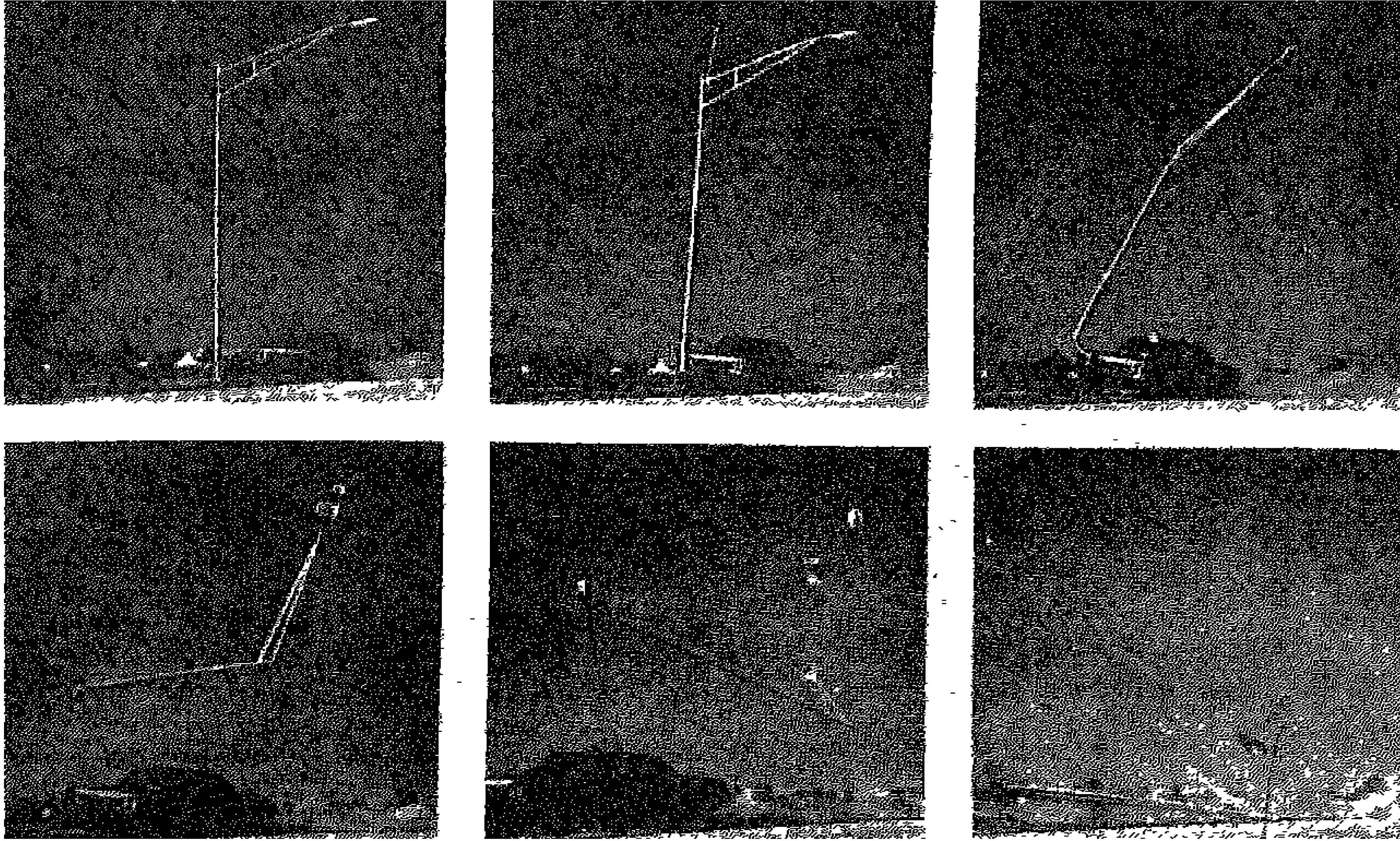
٨ – بالرغم من أن قطر كوكب نبتون أكبر من قطر الأرض باربع مرات تقريبا فان تسارع الجاذبية على نبتون وعلى الأرض متساويان . ماذا يمكنك أن تستنتج عن نبتون من هذه المعلومات ؟

٩ – كلما زادت سرعة قذفك لحجر فى اتجاه مواز للأرض كلما سار الحجر مسافة أطول . اشرح مايمكن أن يحدث للحجر اذا قدفته بسرعة كبيرة فى اتجاه مواز لسطح القمر . افترض أنك تستطيع أن تقذفه بسرعة عالية جدا .

١٠ – لنفرض أنك تريد أن ترفع صندوقا ثقيلا جدا الى ظهر شاحنة ، وكان الصندوق أثقل من أن تستطيع رفعه . اشرح لماذا يمكنك أن ترفعه الى ظهر الشاحنة بزحلقته على لوح يعمل كمستوى مائل بالرغم من أنه أثقل من أن تستطيع حمله .

١١ – كرتان كتلة كل منهما 100 g معلقتان من طرفى خيطين جنبا الى جنب . فاذا كان طول الخيطين 2 m وكانت المسافة بين مركزى الكرتين 10 m ، اعط تقديرا تقريبيا لزاوية ميل الخيطين على الرأسى إذا أمكن اهمال جميع التأثيرات عدا تأثير الجاذبية .

١٢ – يمثل الشكل م ٤ – ١ مجموعة متتالية من الصور التقطت عند اصطدام سيارة بعمود مصباح الشارع مصنوع من الألومنيوم ومن النوع المنفصل . لماذا يقلل العمود من هذا النوع الدمار الذى يحدث للسيارة ؟ قدر سرعة السيارة عند لحظة التصادم . تفصل بين اللقطات فترات زمنية متساوية . (ق)



الشكل (م ٤ – ١)

مسائل

١ – النيوترون جسيم غير مشحون كتلته 1.67×10^{-27} kg ونصف قطره فى حدود 10^{-15} m . اوجد التجاذب التثاقلى بين نيوترونين المسافة بين مركزيهما 10^{-12} m . قارن هذه القوة بوزن النيوترون على الأرض .

٢ – قطعتا عملة معدنيتان كتلة كل منهما m موضوعتان على منضدة والبعد بينهما 50 cm . (أ) أوجد الجذب التثاقلى (بدلالة m) لكل قطعة على الأخرى . (ب) دفعت احدى القطعتان تجاه الأخرى . ماهو معامل الاحتكاك بين قطعة العملة والمنضدة اللازم لكى تستمر هذه القطعة فى الحركة ؟ افترض أن m = 10 g فى الجزء (ب) .

٣ – قارن جذب الجاذبية الأرضية لسفينة فضاء على سطح الأرض بالتجاذب التثاقلى اذا كانت السفينة تدور على بعد 1000 km من سطح الأرض . (نصف قطر الأرض 3900 mi أو 6370 km) .

٤ – كتلة الكوكب جوبيتر تساوى 314 ضعفا لكتلة الأرض ، بينما نصف قطره 11.3 ضعفا لنصف قطر الأرض . أوجد تسارع الجاذبية على جوبيتر .

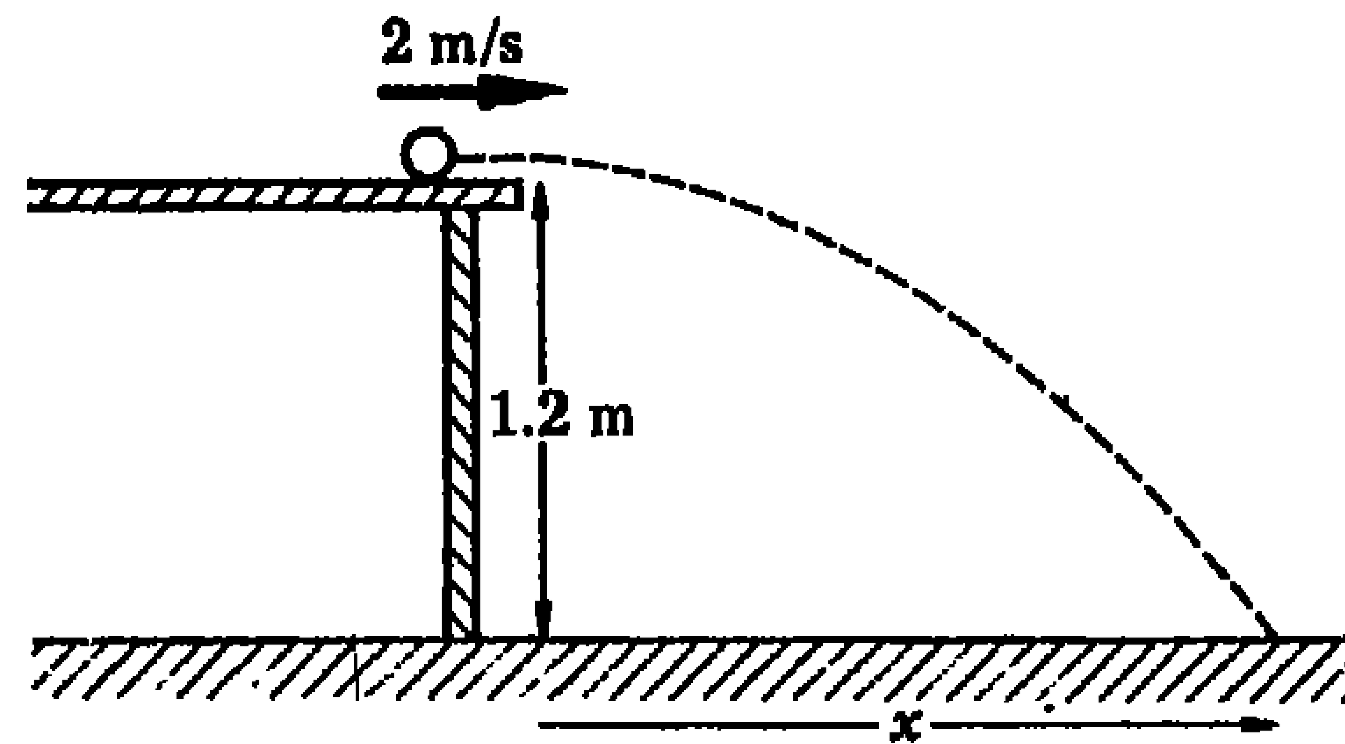
٥ – يراد دفع سيارة وزنها 3600 lb الى أعلى على تل يميل بزاوية قدرها 8° على الأفقى . ماقيمة أقل قوة دفع تلزم لذلك اذا كانت قوى الاحتكاك مهملة ؟

٦ – حرر طفل فرامل سيارة عندما كانت تقف على تل زاوية ميله 11.5° (يعامل التل كمستوى يميل بزاوية قدرها 11.5° على الأفقى) ماهو تسارع السيارة وماسرعة حركتها بعد 10 s ؟ (اهمل الاحتكاك واستعمل نظام الوحدات SI).

٧ – فصل سائق موتور سيارته عندما كانت تتحرك الى أعلى على مستوى مائل زاوية ميله 15° بسرعة قدرها 20 m/s ماهى المسافة التى سوف تقطعها السيارة على المستوى المائل اذا كنت قوى الاحتكاك مهملة ؟

٨ – اذا كان وزن السيارة فى المسألة ٧ هو 1400 kg وكانت المسافة التى قطعتها السيارة قبل التوقف هى 30 m ، ماهو متوسط قوة الاحتكاك (بفرض أنه ثابت) التى أوقفتها ؟

٩ – اذا كان وزن السيارة فى المسألة ٦ هو 2400 lb وكانت سرعتها بعد مرور 10 s هى 9.0 ft/s ، فما هى قوة الاحتكاك التى تعوق حركة السيارة ؟



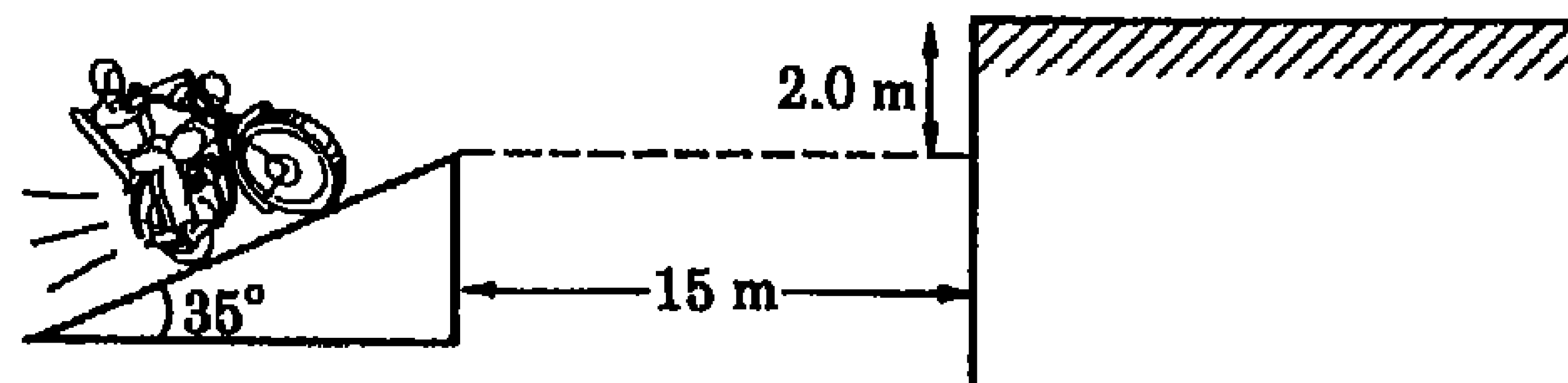
الشكل (م ٤ – ٢)

١٠ – بأى قوة يجب أن تدفع عجلات سيارة وزنها 3200 lb الطريق إلى الخلف إذا لزم أن تصعد هذه السيارة مسافة قدرها 200 ft على مستوى مائل زاوية ميله 11.5° فى زمن قدره 40 s ؟ افترض أن السيارة تبدأ من السكون وأن متوسط قوة الاحتكاك هو 140 lb .

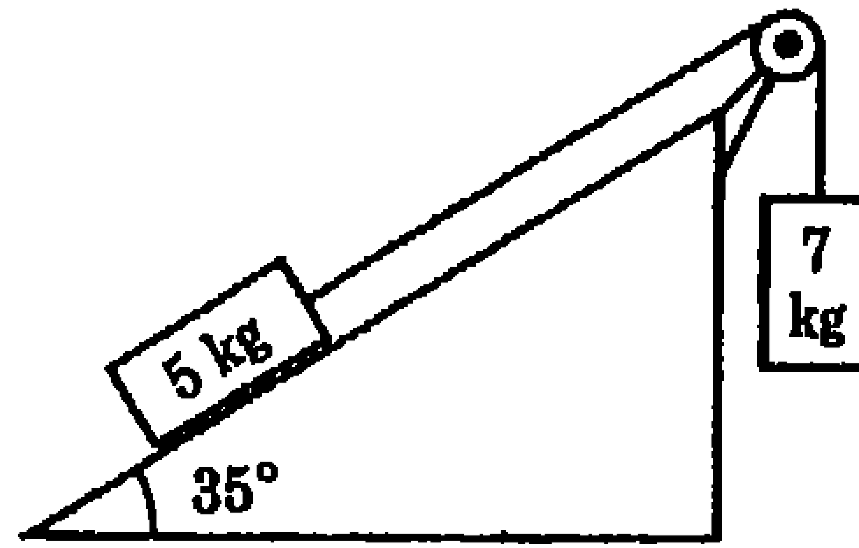
١١ – ماهى القوة التى تستطيع بها سيارة جر مقطورة كتلتها 2000 kg بواسطة وصلة جر الى أعلى على مستوى مائل زاوية ميله 11.5° عندما تتقاصر السيارة بمعدل $0.5\ m/s^2$ ؟ اهمل تأثيرات الاحتكاك .

١٢ – تدحرجت بلية على منضدة افقية ارتفاعها 1.2 m ثم وقعت عند حافتها كما هو مبين فى شكل م ٤ – ٢ . أوجد المسافة المرموز لها بالرمز x اذا كانت البلية تتدحرج بمعدل 2 m/s ماهما المركبتان الرأسية والأفقية لسرعة البلية قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟

١٣ – يقذف خرطوم حريق الماء أفقيا من قمة مبنى عال تجاه حائط مبنى يقع على بعد 20 m . على أى بعد أسفل خرطوم الحريق يصطدم الماء بالحائط اذا كانت سرعة الماء عند خروجه من الخرطوم هو 5.0 m/s ؟ تلميح : اعتبر الماء مكونا من سلسلة من الجسيمات المنطلقة فى اتجاه التيار .



الشكل (م ٤ – ٣)



الشكل (م ٤ – ٤)

١٤ – انطلق الكترون ($m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) افقيا من مدفعة الالكترونات الموجودة فى طرف أنبوبة التليفزيون بسرعة قدرها 10^8 cm/s على أى بعد أسفل المستوى الأصلى يصطدم الالكترون بالستار الفلورى المستخدم للمشاهدة اذا كان هذا الستار يقع على بعد 40 cm فى الطرف الآخر للأنبوبة ؟

١٥ – فى احدى العاب السيرك انطلقت « القنبلة الأدمية » من المدفع بسرعة قدرها 18 m/s وكانت ماسورة المدفع موجهة بزاوية قدرها 40° فوق الأفقى . على أى بعد من فوهة المدفع يجب أن توضع الشبكة (المستخدمة لالتقاف الشخص) ؟
افترض أنها على نفس مستوى فوهة المدفع . واذا كان الشخص يتسارع بانتظام من السكون الى 18 m/s فى مسافة قدرها 3 m فى داخل ماسورة المدفع ، فما هى القوة التى يجب ان تدفع هذا الشخص ؟ اعط اجابتك بدلالة وزن الشخص W .

١٦ – قذفت كرة من كوبرى ارتفاعه 30 m عن سطح الماء بسرعة قدرها 20 m/s بزاوية قدرها 30° تحت الأفقى . (أ) على أى بعد تصطدم الكرة بالماء بالنسبة لنقطة على سطح الماء تقع تحت نقطة القذف مباشرة ؟ (ب) ماهو الزمن الذى تقضيه الكرة فى الهواء ؟

١٧ – كرر المسألة ١٦ بالنسبة لكرة تقذف بزاوية قدرها 30° فوق الأفقى .

١٨* – كما هو موضح فى شكل م ٤ – ٣ ، يريد أحد سائقى الدراجات البخارية البارعين أن ينطلق من المستوى المائل ويهبط على الرصيف . بأى سرعة يجب أن تتحرك الدراجة البخارية لكى ينجح السائق فى ذلك ؟

١٩* – قذف مقذوف من الأرض بسرعة قدرها v وبزاوية قدرها θ فوق الأرض الأفقية المستوية ثم عاد الى الأرض على مسافة R من نقطة القذف . اثبت أن مدى المقذوف يعطى بالعلاقة :

$$R = \frac{2v_0^2 \sin\theta \cos\theta}{g}$$

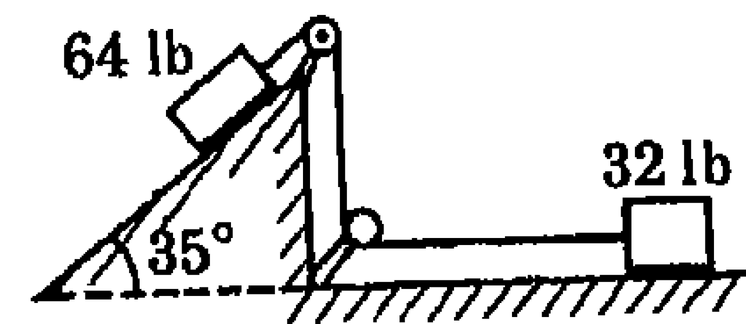
بفرض أن قوى الاحتكاك مهملة . باستخدام الصيغة المثلثية $2 \sin\theta \cos\theta = \sin 2\theta$ اثبت أن المدى يصل الى النهاية العظمى اذا كانت $\theta = 45°$

٢٠ – تأمل القالبين الموضحين فى شكل م ٤ – ٤ . أوجد تسارع القالبين والشد فى الحبل اذا كان الاحتكاك مهملا .

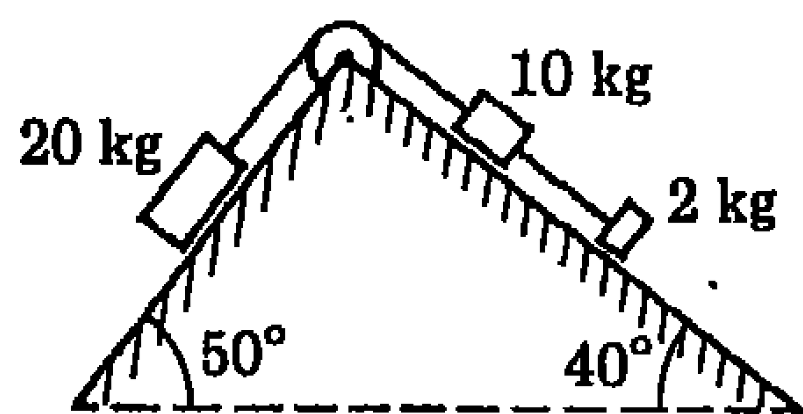
٢١* – كرر المسألة ٢٠ بفرض أن $\mu = 0.20$.

٢٢** – يعانى كل من القالبين الموضحين فى شكل م ٤ – ٥ قوة احتكاك قدرها 5 lb . ماهو الزمن اللازم لكى يقطع القالب الذى كتلته 32 lb مسافة قدرها 19 ft اذا بدأ من السكون .

٢٣** – اوجد الشد فى الحبال المختلفة الموضحة فى شكل م ٤ – ٦ وتسارع القوالب اذا كان μ لكل منها يساوى 0.20 .



الشكل (م ٤ – ٥)



الشكل (م ٤ – ٦)

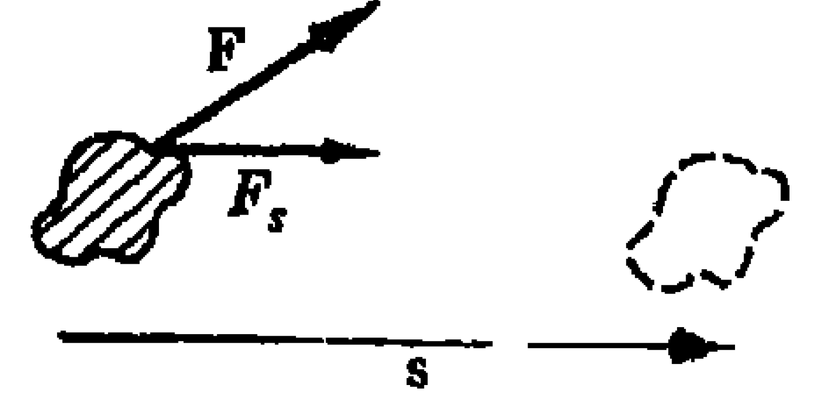
الفصل الخامس

الشغل والطاقة

إن أحد اهداف العلماء هو اكتشاف طرق توحيد وتبسيط مختلف الحقائق والمفاهيم فى مجال تخصصهم . وقد ناقشنا فى الفصول السابقة القوى وأثرها فى انتاج الحركة ، ويمكننا من ناحية المبدأ أن نصف جميع الحركات بدلالة القوى التى تسببها . ومع ذلك فإن المفهوم الذى سنقدمه فى هذا الفصل وهو بقاء الطاقة يوحد وييسط كثيرا وصف الحركة فى كثير من الحالات . وسنجد أن مبدأ بقاء الطاقة هو مفهوم موحد هام ليس فقط فى علم الميكانيكا ، ولكن أيضا فى فروع أخرى من علم الفيزياء . ولكى نفهم هذا المبدأ سنناقش أولا مفهوم الشغل وكيف يؤدى الى مفهوم الطاقة .

٥ - ١ تعريف الشغل

عندما تجلس الى مكتبك لدراسة هذا الكتاب فانك لاتعمل شغلا . ولكن هذه العبارة لاتعنى أنك كسولا أو أن دراسة الفيزياء عملية لاتحتاج الى مجهود ، فهى تقرر فقط حقيقة تنشأ من تعريف الشغل كما يستخدمه العلماء . ونظرا لأن هناك طرقا كثيرة جدا لاستخدام كلمة الشغل فى الحياة اليومية فان الاتفاق على معنى دقيق التحديد لهذه الكلمة يكتسب أهمية خاصة .



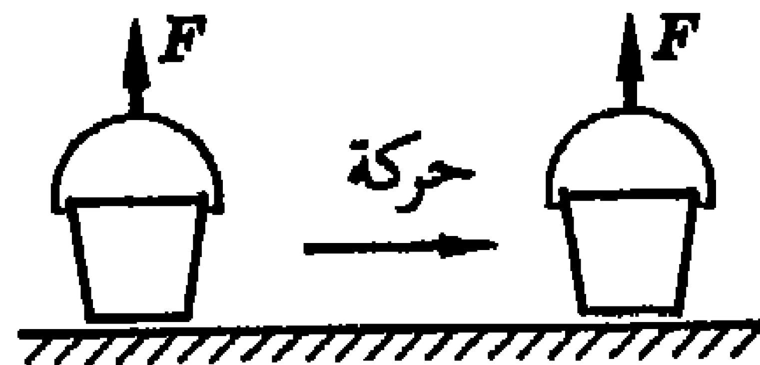
هل يعمل لاعب البيسبول شغلا عندما يلعب البيسبول ؟ قد يقول كثير من الناس أنه لايعمل لأنه يلعب لعبة مسلية . وماذا لوكان اللاعب يتقاضى أجرا ليلعب البيسبول ؟ هل تعمل الأرض المبنى عليها المنزل شغلا ؟ هى تحمل المنزل . وهل تختلف هذه الأرض فى وظيفتها اذن اختلافا جوهريا عن العمود الذى يحمل سقف المدخل الخارجى للمنزل ؟ ومع ذلك فان البعض قد يصرون على أن العمود يعمل شغلا . من الواضح اذن أنه اذا أردنا استخدام كلمة الشغل كمصطلح علمى فى الفيزياء فلابد من تعريفه بطريقة دقيقة .

يعرف علماء الفيزياء وغيرهم من العلماء الشغل الذى تبذله قوة ما بالطريقة الآتية لنفرض أن القوة F تؤثر على جسم ما وأن هذا الجسم قد اكتسب ازاحة قدرها S . لنفرض زيادة على ذلك أن F_s هى مركبة F فى اتجاه S كما هو مبين فى شكل ٥ -

تعريف الشغل — **يعرف اذن الشغل المبذول بواسطة القوة F خلال الازاحة S بأنه :**

$$\text{Work done by } F = F_s s \qquad (٥ - ١)$$

وعند قبول هذا التعريف ينتج أن القوة الحاملة التى يؤثر بها عمود يحمل ثقلا لاتبذل شغلا ، فان هذا الثقل لايتحرك تحت تأثير القوة وعليه فان S تساوى صفرا . بالمثل ، عندما تحمل سطلا من الماء وتظل ساكنا فى مكانك لمدة ساعة فان القوة الحاملة ليدك لاتبذل أى شغل على السطل لأن السطل لم يتحرك . وعليه فإن S تساوى صفرا وكذلك الشغل المبذول بواسطة القوة .



لنفرض أنك تحمل السطل على أرض مستوية وتعبر به نقطتين المسافة بينهما $\frac{1}{2}$ mi . عندئذ يكون الشغل المبذول بواسطة القوة **F** على السطل صفرا حسب التعريف . وكما نرى من شكل ٥ — ٢ فإن يدك تجذب السطل الى أعلى بالقوة الحاملة **F** ، وعليه فإن F_s تساوى صفرا وكذلك فإن الشغل المبذول بواسطة القوة الحاملة أثناء هذه الازاحة يساوى صفرا* .

مثال توضيحى ٥ — ١ . كمثال توضيحى آخر لنفرض أنك كنت تجذب مزلجة (زحافة) على جليد مستو كما هو موضح فى شكل ٥ — ٣ أ . عندئذ ستبذل قوة قدرها **F** على المزلجة بواسطة الحبل الذى تجذبه . ماهو الشغل الذى تبذله عندما تجذب المزلجة مسافة قدرها s ؟

طريقة الحل . لاجابة هذا السؤال لاحظ أن القوة F يمكن اعتبارها مكونة من قوتين وهما مركبتيها كما هو مبين فى شكل ٥ — ٣ ب . وحيث أن المركبة الرأسية ، $F \sin\theta$ عمودية على اتجاه الحركة ، فانها لاتبذل شغلا على المزلجة . أما المركبة الافقية ، $F\cos\theta$ ، فانها موازية لاتجاه الحركة ، لذلك فانها تبذل شغلا على المزلجة . الشغل المبذول هو :

معادلة الشغل

$$\text{Work} = (F\cos\theta)s = Fs\cos\theta \qquad (٥ - ٢)$$

يمكن استخدام المعادلة (٥ — ٢) كمعادلة تعريف للشغل المبذول لأنها فى الواقع المعادلة (٥ — ١) مكتوبة بطريقة مختلفة** . تقول هذه المعادلة ببساطة أن الشغل المبذول يساوى حاصل الضرب التالى : (القوة المؤثرة) (الازاحة) (جيب تمام الزاويه المحصورة بين القوة والازاحة) . وفى بعض الأحيان ستستخدم المعادلة (٥ — ٢) بدلا من المعادلة المكافئة لها وهى المعادلة (٥ — ١) .

---

* اذا كان السطل متحركا بسرعة ثابتة بين النقطتين فمن السهل اثبات أن الشغل المبذول بواسطة القوى الافقية على السطل يساوى صفرا . تذكر أنه فى الحركة بسرعة ثابتة تكون القوة المحصلة المؤثرة على السطل مساوية للصفر . بناء على ذلك فان صافى القوة الافقية المؤثرة على السطل تساوى صفرا ، وعليه فإن القوى الأفقية لاتبذل أى شغل . أما إذا بدأ السطل حركته من السكون ثم توقف عن الحركة فى الطريق فان شغلا معينا لابد أن يكون قد بذل فى بداية الحركة ، ولكن هذا الشغل يسترد ثانية عند توقف الحركة كما سنرى فى الأجزاء التالية . وهكذا فان صافى الشغل المبذول بواسطة القوى الافقية المؤثرة على السطل يساوى أيضا صفرا .

** فى علم الفيزياء يكتب حاصل الضرب $Fs\cos\theta$ عادة على الصورة **F.s** وهذه المجموعة من الرموز تعنى بالكلمات مايلى : « خذ حاصل ضرب مقدار القوة الموجهة فى مقدار الازاحة الموجهة واضرب هذا الحاصل فى جيب تمام الزاوية المحصورة بين المتجهين » . وباستخدام هذه المجموعة من الرموز تتحول معادلة تعريف الشغل الى الصورة التالية :

$$\text{Work} = \mathbf{F}\cdot\mathbf{s}$$

لاحظ أن $\mathbf{F}.\mathbf{s} = F(s\cos\theta) = (F\cos\theta)s = Fs\cos\theta$. ويسمى حاصل ضرب المتجهين بهذه الطريقة بحاصل الضرب العددى .

يمكننا استنتاج الوحدات المستخدمة لقياس الشغل من معادلة تعريف الشغل (٥ - ١) أو (٥ - ٢) . هناك ثلاث وحدات مختلفة للشغل ، واحدة لكل من النظام البريطانى والنظام SI والنظام cgs للوحدات . تعرف هذه الوحدات الثلاث كمايلى .

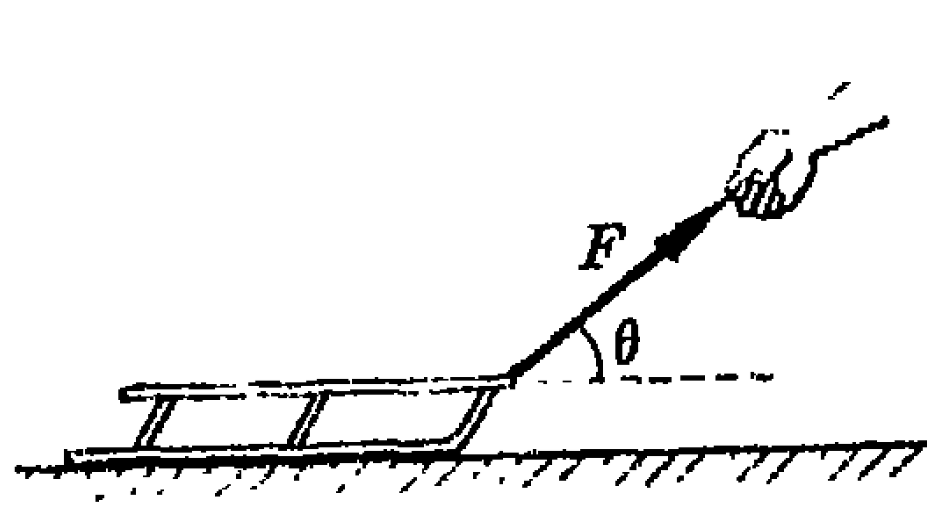
	الشغل	=	F_s	×	s
النظام البريطانى	قدم . باوند		باوند		قدم
النظام SI	جول		نيوتن		متر
النظام cgs	ارج		داين		سنتيمتر

لايجب أبدا خلط الوحدات فى هذه المعادلة ، ويجب أن تكون الكميات مقاسة فى نظام وحدات واحد .

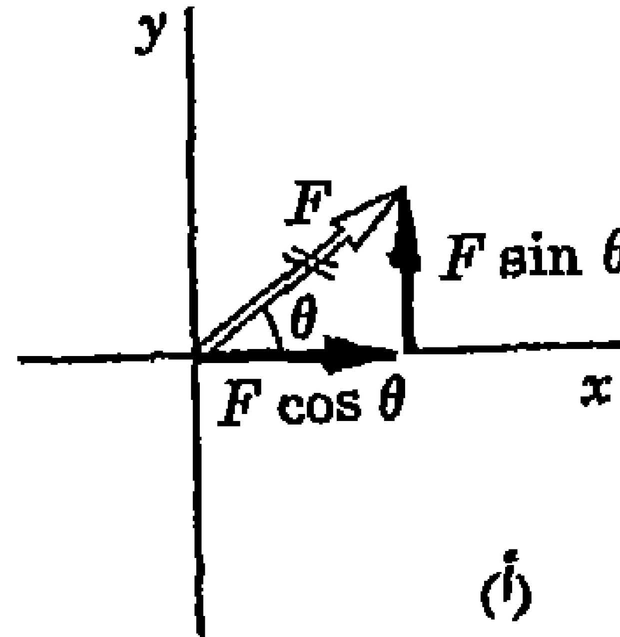
وحدات الشغل

وقياسا على الطريقة التى تسمى بها الوحدة البريطانية للشغل،يسمى الجول (J) من الشغل أحيانا **بالنيوتن - متر** من الشغل . وبالمثل ، فان الإرج من الشغل يسمى أحيانا **بالداين . سنتيمتر** من الشغل . ومع ذلك فان الجول والإرج هما الصورتان المفضلتان . لاحظ أن الإرج من الشغل صغير جدا لأن كلا من الداين والسنتيمتر وحدات صغيرة جدا للقوة والمسافة . وحيث أن النيوتن اكبر من الداين 10^5 مرة والمتر اكبر من السنتيمتر 10^2 مرة فان الجول اكبر من الارج 10^7 مرة . كذلك يمكننا أن نثبت أن الجول من الشغل اصغر قليلا من القدم - باوند من الشغل ، والعلاقة التقريبية بينهما كالتالى :

$$1\ J = 0.738\ ft \cdot lb$$



(ب)



(أ)

شكل (٥ - ٣)
لاتبذل المركبة الرأسية للقوة F أى شغل لأن المزلجة لاتتحرك الى أعلى أو الى أسفل . يبذل الشغل جميعه بواسطة القوة $F\cos\theta$ وهى المركبة الموازية لاتجاه الحركة .

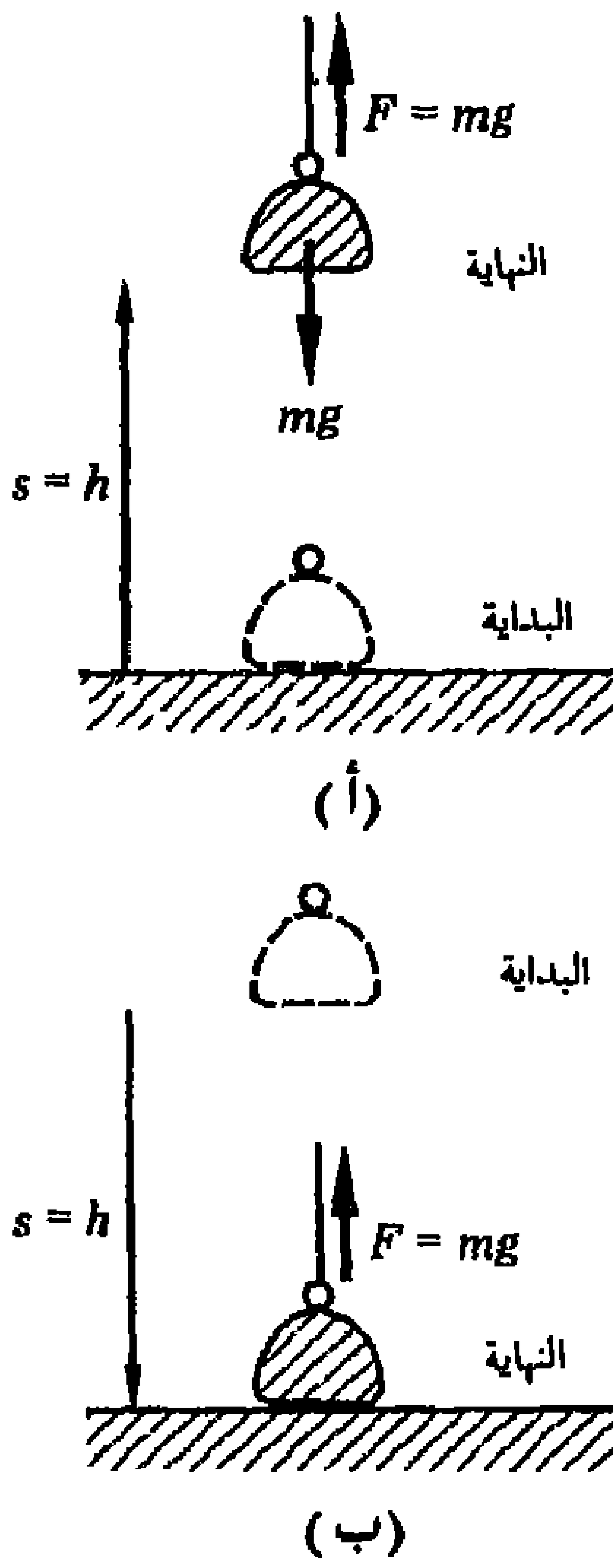
لنلخص الآن ماتعلمناه عن الشغل .

الشغل المبذول بواسطة القوة **F** المؤثرة أثناء الازاحة **S** هو :

$$F_x s \quad \text{أو} \quad Fs\cos\theta$$

فى هذين التعبيرين المتكافئين F هى مركبة **F** فى اتجاه الازاحة **S** والزاوية θ هى الزاوية المحصورة بين **F** و **S** .

وحدات الشغل هى الجول أو الإرج أو القدم – باوند كما هو مبين فى الجدول المعطى فى الصفحة السابقة .



شكل (٥ – ٤)
الشغل المبذول بواسطة القوة الرافعة يساوى mgh فى الحالة (أ) ويساوى $-mgh$ فى الحالة (ب) .

مثال توضيحى ٥ – ٢ . ماهو الشغل الذى تبذله على جسم وزنه mg عندما ترفعه ببطء مسافة قدرها h رأسيا الى أعلى ؟ كرر المسألة فى حالة خفض الجسم ببطء نفس المسافة .

طريقة الحل . هذان الوضعان ممثلان فى شكل ٥ – ٤ . لكى يرفع الجسم لابد من جذبه الى أعلى بقوة تساوى وزنه mg (لتحقيق ذلك نحتاج الى قوة اكبر قليلا من وزنه لكى يكتسب الجسم تسارعا ابتدائيا الى أعلى . ولكن بمجرد أن يتحرك الجسم لن نحتاج الى أية قوة محصلة لكى تستمر الحركة . ونتيجة لذلك فان قوة جاذبة الى أعلى تساوى وزن الجسم هى التى تلزم لحركة الجسم بسرعة ثابتة الا فى اللحظة الأولى فقط) . وكما نرى من شكل ٥ – ٤ أ فإن القوة الرافعة هى mg وتساوى وزن الجسم . ولكن الازاحة h رأسية الى أعلى والقوة الرافعة فى نفس الاتجاه . اذن يمكننا استخدام أى من المعادلتين (٥ – ١) أو (٥ – ٢) لنحصل على :

$$\text{Work} = F_s s = Fs \cos 0^\circ = (mg)h$$

وهذا هو الشغل الذى يجب أن تبذله لرفع الكتلة مسافة h .

من ناحية أخرى يوضح الشكل ٥ – ٤ ب مايحدث عندما تخفض الكتلة . فى هذه الحالة يكون كل من القوة **F** والازاحة **S** فى اتجاهين متعاكسين .

اذن $F = mg$ و $\theta = 180^\circ$. وباستخدام المعادلة (٥ – ٢) نجد ان :

$$\text{Work} = Fs \cos \theta = (mg)(h) \cos 180^\circ = -mgh$$

الشغل السالب

لاحظ أن الشغل المبذول بواسطة القوة يكون سالبا اذا كانت الازاحة فى عكس اتجاه القوة .

مثال توضيحى ٥ – ٣ : يمثل شكل ٥ – ٥ صندوقا يجذب على الأرضية بسرعة ثابتة بقوة قدرها F . ولنفرض أن قوة الاحتكاك المعاكسة للحركة هى 20 N وأن كتلة الصندوق هى 30 kg ، اوجد الشغل المبذول بواسطة القوة الجاذبة عندما يتحرك الجسم مسافة قدرها 5.0 m .

طريقة الحل . حيث أن الجسم يتحرك بسرعة ثابتة فإن القوة غير المتزنة المؤثرة عليه لابد أن تساوى صفرا ، أى أن $\Sigma F_x = 0$. يمثل الشكل ٥ – ٥ ب رسم بيان الجسم الحر فى هذه الحالة . وبناء على ذلك نجد أن العلاقة $\Sigma F_x = 0$ تتحول الى الصورة :

$$0.8F - 20\ \text{N} = 0$$

ومن هذه المعادلة نجد أن :

$$F = 25\ \text{N}$$

لايجاد الشغل المبذول بواسطة هذه القوة يمكننا استخدام العلاقة التالية :

$$\text{Work} = F_s s$$

لنحصل على :

$$\text{Work} = (0.80F)(5.0\ \text{m}) = 100\ \text{N} \cdot \text{m} = 100\ \text{J}$$

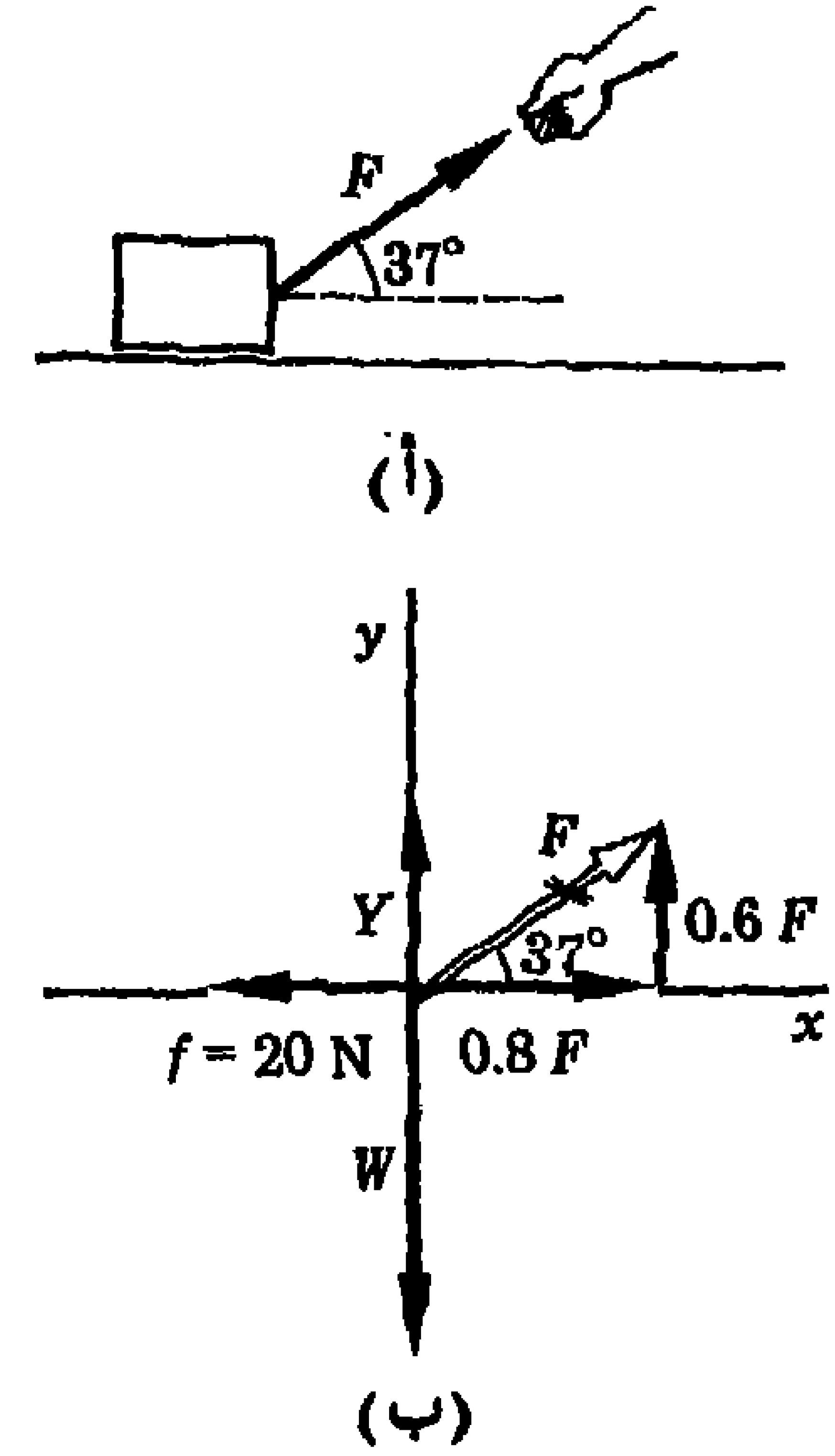
كذلك يمكننا استخدام العلاقة :

$$\text{Work} = Fs\cos\theta$$

لنحصل على :

$$\text{Work} = (25\ \text{N})(5\ \text{m})(0.80) = 100\ \text{J}$$

لاحظ أن المركبة y للقوة **F** لاتبذل أى شغل ، وذلك لأن الازاحة لاتحدث فى هذا الاتجاه .



شكل (٥ – ٥)
المركبة الافقية للقوة F تبذل شغلا على الجسم ولكن الشغل المبذول بواسطة المركبة الرأسية يساوى صفرا .

٥ – ٢ القدرة

تعريف يسمى معدل بذل الشغل **بالقدرة** ، وهى تعرف بأنها الشغل المبذول وحدة الزمن . ويمكننا كتابة هذا التعريف على صورة الصيغة الرياضية الآتية :

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{الزمن اللازم لبذل الشغل}} \qquad (٥ - ٣)$$

$$P = \frac{\text{شغل}}{\text{الزمن}}$$

وحدات القدرة عبارة عن أى وحدة للشغل مقسومة على أى وحدة للزمن . ولكن الوحدات الاكثر شيوعا هى :

$$P \rightarrow \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{watts (W)}$$

$$P \rightarrow \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{s}}$$

فى بعض الأحيان تستخدم وحدات اخرى للقدرة . فمثلا ، الكيلو واط وهى وحدة اكبر بمقدار 1000 مرة من الواط . وتستخدم وحدة **قدرة الحصان** (hp) كثيرا فى النظام البريطانى ، وتعرف هذه الكمية بأنها $550\ ft \cdot lb/s$

وحيث أن 1 ft · lb/s تكافىء 1.36 W فان *1 hp* تساوى *746 W* من القدرة .

وحيث أن تعريف القدرة هو :

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}}$$

$$P = \frac{\text{work}}{\text{time}}$$

فإن :

الشغل = (الزمن) (القدرة)

$$\text{Work} = (\text{power})(\text{time})$$

وتعتبر هذه المعادلة للشغل اساس وحدة الشغل أو الطاقة التى سنقابلها فى علم الكهربائية وهى الكيلو واط ساعة (KWh) . وهذا يعنى أنه إذا كان خرج القدرة لمكنة (الة) مقاسا بالكيلو واط وكان زمن التشغيل مقاسا بالساعة فان حاصل ضرب القدرة فى الزمن يعطى الشغل بالكيلو واط ساعة .

مثال توضيحى ٥ – ٤ . لنفرض أن الموتور الموضح فى شكل ٥ – ٦ يرفع جسما وزنه 480 lb بسرعة ثابتة قدرها 2 in/s . ماهى القدرة بالحصان التى ينتجها الموتور ؟ وماهى القدرة بالواط ؟

طريقة الحل : يبذل الموتور الكمية التالية من الشغل فى زمن قدره 1 s :

الشغل المبذول فى زمن قدره 1 s = (المسافة المرفوعة فى 1 s) (القوة) .

$$\begin{aligned}\text{Work in 1 s} &= (\text{force})(\text{distance lifted in 1 s})\\ &= (480\ \text{lb})(\tfrac{2}{12}\ \text{ft}) = 80\ \text{ft}\cdot\text{lb}\end{aligned}$$

ولكن من تعريف القدرة :

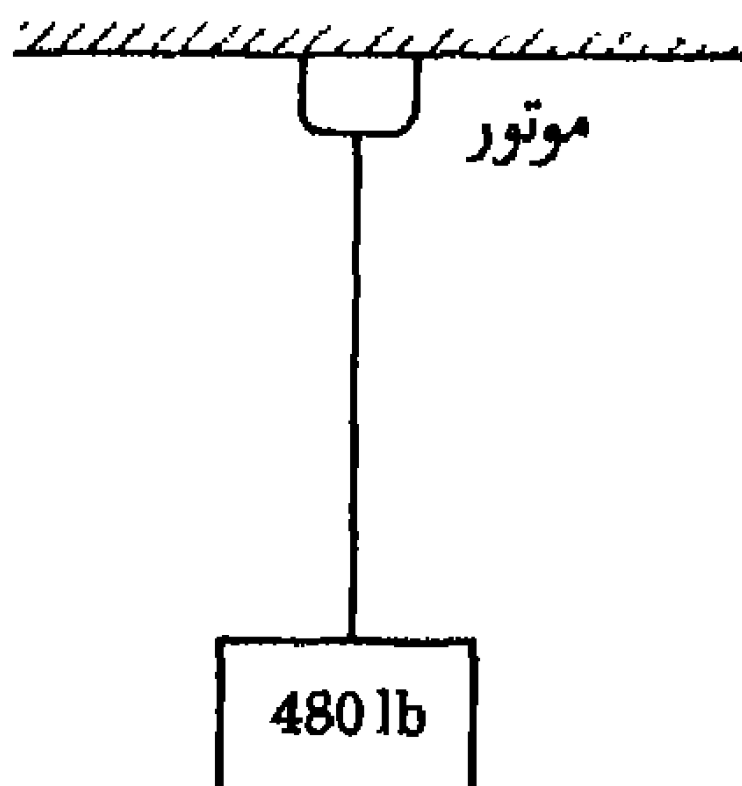
$$\text{Power} = \frac{\text{work}}{t} = \frac{80\ \text{ft}\cdot\text{lb}}{1\ \text{s}} = 80\ \text{ft}\cdot\text{lb/s}$$

$$= (80\ \text{ft}\cdot\text{lb/s})\left(\frac{1\ \text{hp}}{550\ \text{ft}\cdot\text{lb/s}}\right) = 0.145\ \text{hp}$$

وحيث أن 1 hp = 746 W ، فإن :

$$\text{Power} = (0.145\ \text{hp})\left(\frac{746\ \text{W}}{1\ \text{hp}}\right) = 108\ \text{W}$$

شكل (٥ – ٦)
يراد ايجاد خرج القدرة لموتور يرفع الجسم بسرعة قدرها 2.0 in/s



٥ – ٣ طاقة الحركة

يستطيع الجسم المتحرك أن يبذل شغلا ، فمثلا تبذل المطرقة شغلا على المسمار عند طرقه لادخاله فى قطعة الخشب . كذلك فإن كرة البيسبول يمكن أن تكسر النافذة عندما تصطدم بها . هناك أيضا أمثلة أخرى يمكن أن نسوقها لتوضيح أن الجسم المتحرك عندما يبطىء حركته فأنه يبذل شغلا . وكما سنرى فيما بعد فإن

هذه حقيقة هامة جدا وسوف نستخدمها كثيرا . لنتبين الآن كيف يرتبط الشغل بالحركة .

لكى نبدأ مناقشتنا لنتبين الآن كيف تعتمد حركة الجسم على القوة غير المتزنة المؤثرة عليه . لنفرض أن جسما كتلته m يقع تحت تأثير قوة محصلة ثابتة **F** فى اتجاه الازاحة s . الشغل المبذول بواسطة هذه القوة أثناء هذه الازاحة يعطى بالعلاقة :

$$\text{Work} = Fs$$

يراد الآن ايجاد العلاقة بين الشغل والتغير فى حركة الجسم الناتجة من هذه القوة غير المتزنة .

من المعروف أن القوة غير المتزنة F ترتبط بتسارع الجسم حسب العلاقة $F = ma$ ،وعليه فان المعادلة السابقة للشغل ستأخذ الصورة :

$$\text{Work} = mas$$

لنفرض أن v_0 هى السرعة الابتدائية للجسم و v_f هى سرعته النهائية بعد بذل الشغل . وحيث أن :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

يمكننا بالتعويض أن نحصل على العلاقة :

$$\text{Work} = \tfrac{1}{2}mv_f^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2$$

وهذه علاقة هامة جدا ، وهى تبين أن :

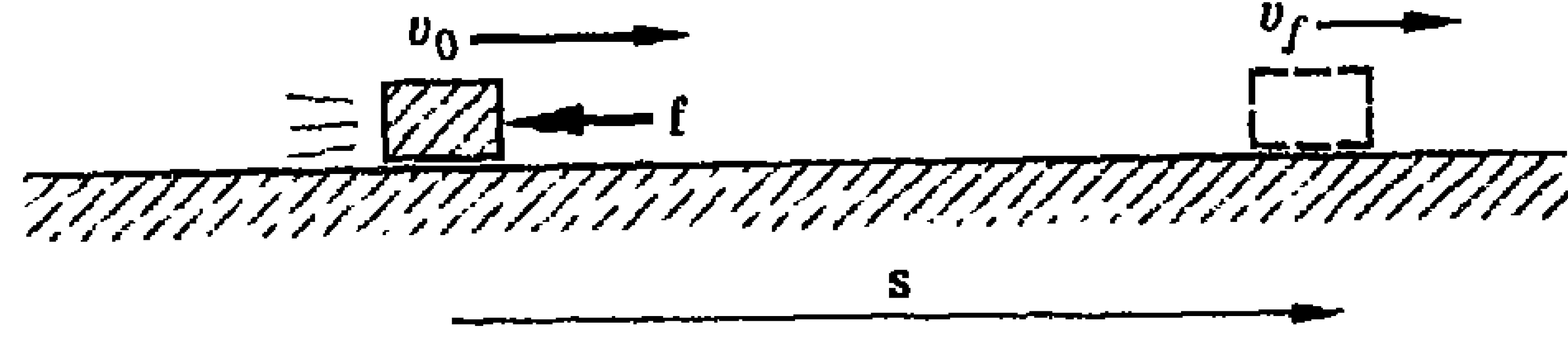
الشغل المبذول بواسطة القوة المحصلة على الجسم يؤدى إلى تغير فى حركة الجسم . لدينا اذن العلاقة :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة القوة المحصلة} = \tfrac{1}{2}mv_f^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2 \qquad (٥ - ٤)$$

وبالرغم من أن هذه العلاقة قد استنتجت فى حالة ثبوت القوة المحصلة فإنها صحيحة فى جميع الحالات . فاذا وقع الجسم تحت تأثير قوة محصلة ما فإن الشغل المبذول بواسطة القوة يرتبط بالتغير فى سرعة الجسم حسب المعادلة (٥ - ٤) .

عند اشتقاق هذه المعادلة فرضنا ضمنيا أن القوة تسبب زيادة سرعة الجسم . ومع ذلك فليس هناك مايحتم ذلك فى اشتقاق هذه المعادلة ، اذ أن المعادلة (٥ - ٤) تظل صحيحة أيضا اذا كان الجسم يبطىء حركته . ويمكن اثبات ذلك بالرجوع الى شكل ٥ - ٧ . يمثل هذا الشكل جسما يبطىء من حركته عند الانزلاق على منضدة . لاحظ أن قوة الايقاف وهى قوة الاحتكاك f فى عكس اتجاه الازاحة .

ونتيجة لذلك فان $Fs \cos \theta$ تصبح سالبة فى هذه الحالة $\cos \theta = -1$. واذا نظرنا الآن الى المعادلة (٥ – ٤) فاننا سنجد أن v_f لابد أن تكون اصغر من v_0 لأن الشغل المبذول سالب فى هذه الحالة . وتوضح لنا هذه المعادلة أن الجسم يتباطأ نتيجة لشغل الاحتكاك السالب المبذول عليه .



شكل (٥ – ٧)
تبذل قوة الاحتكاك شغلا سالبا على القالب . وعليه فإن القالب يتباطأ حسب العلاقة .
$fs \cos \theta = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$.

تعريف

وكما نرى من هذه المناقشة ، يرتبط الشغل بالكمية $\frac{1}{2}mv^2$.وقد سميت هذه الكمية **بطاقة الحركة** (KE) . وقد اشتق هذا الاسم من الكلمات اليونانية *kinetikos* (وتعنى «بعث الحركة») و *energeia* (وتعنى « نشاط ») .

طاقة الحركة

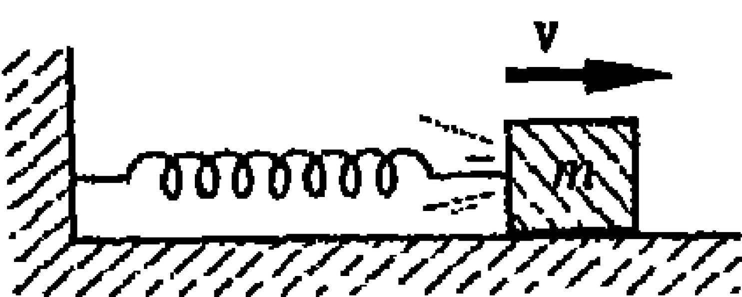
يمكننا أذن وضع التعريف التالى : طاقة الحركة (KE) هى $\frac{1}{2}mv^2$ وهى تمثل الحد الاقصى للشغل الذى يستطيع أن . يبذله جسم كتلته m نتيجة لحركته بسرعة قدرها v .

لتوضيح ذلك تذكر أننا قد رأينا من الشكل ٥ – ٧ أن الجسم يفقد طاقة الحركة عندما يبذل شغلا ضد قوة الاحتكاك . وفى الحقيقة فان طاقة الحركة المفقودة تساوى الشغل المبذول ضد قوة الاحتكاك . وليس من الضرورى أن تكون قوة الايقاف هى قوة الاحتكاك بالذات ، فهى يمكن أن تكون مثلا نتيجة لسلك زنبركى مثبت فى الجسم كما هو مبين فى شكل (٥ – ٨) حيث يسبب القالب المنزلق استطالة السلك الزنبركى عندما يتباطأ ويصل الى السكون . ويستغل الشغل المبذول ضد قوة الاحتكاك فى هذه الحالة فى استطالة السلك . هناك أمثلة كثيرة أخرى يمكن أن نذكرها لبيان ان الجسم المتحرك يبذل شغلا عندما يصل الى السكون أو يبطىء من حركته . وقد وجد أن العبارة التالية صحيحة فى مثل هذه الحالات :

شكل (٥ – ٨)
فى خلال الزمن الذى تصل الكتلة خلاله الى السكون تكون قد بذلت شغلا قدره $\frac{1}{2}mv^2$ فى اطالة السلك الزنبركى .

> عندما يفقد الجسم طاقة الحركة فانه يبذل كمية من الشغل تساوى طاقة الحركة المفقودة .

لنطبق الآن هذه النتيجة على بعض الأمثلة .



مثال توضيحى ٥ – ٥ : تتحرك سيارة كتلتها 2000 kg بسرعة قدرها 20 m/s وتبطىء من سرعتها لتصل الى السكون على أرض مستوية فى مسافة قدرها 100 m . ماهو متوسط قوة الاحتكاك التى تسبب وقوف السيارة ؟

طريقة الحل . تفقد السيارة حركتها الابتدائية فى بذل الشغل ضد متوسط قوة الاحتكاك $\bar{f}$ اذن :

الشغل المبذول ضد قوة الاحتكاك = طاقة الحركة المفقودة

$$\text{Loss in KE} = \text{work done against friction force}$$
$$\tfrac{1}{2}mv^2 = \bar{f}s$$
$$\tfrac{1}{2}(2000 \text{ kg})(20 \text{ m/s})^2 = (\bar{f})(100 \text{ m})$$
$$\bar{f} = 4000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 4000 \text{ N}$$

تم الحصول على العلاقة المتبادلة للوحدات فى هذه الخطوة الاخيرة بكتابة الوحدات فى المعادلة $F = ma$.

مثال توضيحى ٥ – ٦ اذا كانت قوة الاحتكاك المؤثرة على السيارة فى المثال التوضيحى ٥ – ٥ ثابتة وتساوى 4000 N ، فما سرعة حركة السيارة بعد أن تقطع مسافة 50 m ؟

طريقة الحل . طاقة حركة السيارة المفقودة خلال الزمن الذى تقطع فيه السيارة 50 m استهلكت فى بذل الشغل ضد الاحتكاك . اذن :

شغل الاحتكاك المبذول = طاقة الحركة المفقودة

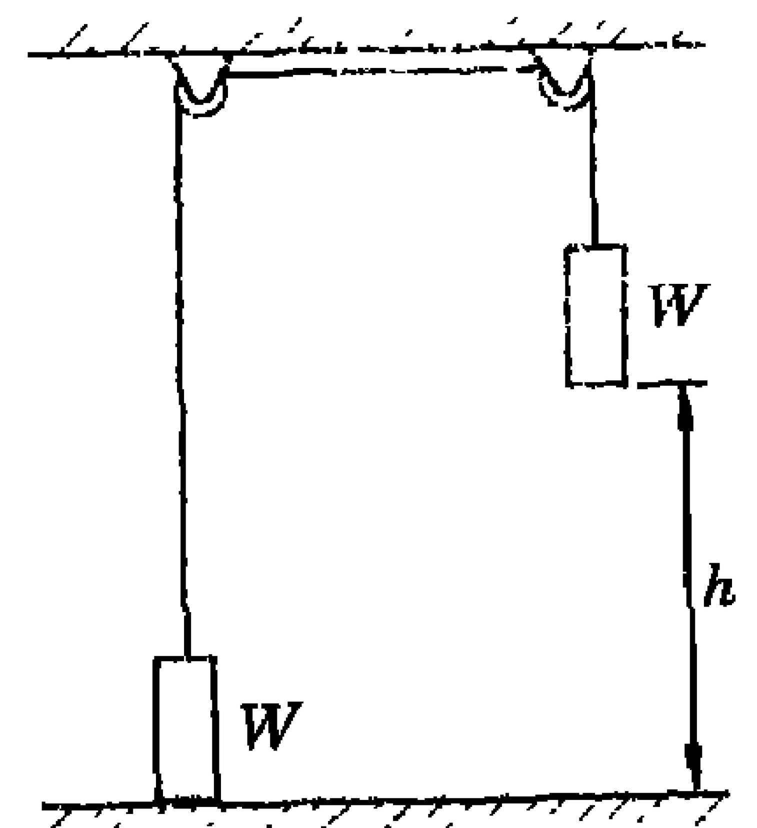
$$\text{Loss in KE} = \text{friction work done}$$
$$\tfrac{1}{2}mv_0^2 - \tfrac{1}{2}mv_f^2 = \bar{f}s$$
$$\tfrac{1}{2}(2000 \text{ kg})(20 \text{ m/s})^2 - \tfrac{1}{2}(2000 \text{ kg})v^2 = (4000 \text{ N})(50 \text{ m})$$

أو ، بعد اعادة ترتيب الحدود :

$$v^2 = 400 - 200 \text{ m}^2/\text{s}^2$$
$$v = \sqrt{200} \text{ m/s} = 14.1 \text{ m/s}$$

حيث استخدمنا حقيقة أن 1 N يساوى 1 kg. m/s^2 .

٥ – ٤ طاقة الوضع



شكل (٥ –٩)
عندما يسقط الجسم الايمن فانه يبذل شغلا فى رفع الجسم الايسر . وفى هذه الحالة يتعادل فقد طاقة وضع الجسم الأيمن مع كسب طاقة وضع الجسم الآخر .

تأمل المجموعة الموضحة فى شكل ٥ – ٩ واعتبر أن البكرتين لا احتكاكيتين . حيث أن الجسمين متماثلان تماما ووزن كل منهما $W = mg$ فاذا دفع الجسم العلوى دفعة صغيرة الى أسفل فان الجسم الايمن سوف يسقط الى الأرضية بسرعة ثابتة أما الجسم الايسر فانه سوف يرتفع الى ارتفاع قدره h فوق الأرضية . أى أن ارتفاعه سيزداد بمقدار h .

السؤال الآن هو : ماقيمة الشغل المبذول على الجسم الايسر بواسطة الحبل عندما يرتفع هذا الجسم فوق الأرضية ؟ من الواضح أن الشغل يساوى الشد فى الحبل mg مضروبا فى الارتفاع الذى يرتفعه الجسم .

$$\text{الشغل المبذول} = mgh$$

ماهو العامل الذى بذل هذا الشغل ؟ هذا بالطبع هو وزن الجسم الايمن الذى يجذب الجسم الآخر الى أعلى ، وبالتالى ، فانه يبذل الشغل . يجب أذن أن نستنتج أن الجسم الايمن كان قادرا على بذل الشغل عندما كان معلقا فى موضعه الأصلى فوق أرضية الغرفة . يقال عندئذ أن هذا الجسم كان يملك **طاقة وضع** (PE) تثاقلية عندما كان فى هذا الموضع ... وطاقة الوضع التى يملكها الجسم هى مقدار الشغل الذى يستطيع الجسم بذله بسبب موضعه . وتعطى طاقة حركة الجسم الموجود فى مجال الجاذبية للأرض بالعلاقة . **تعريف**

طاقة الوضع التثاقلية $= mgh$ (٥ — ٥) **طاقة الوضع التثاقلية**

حيث m كتلة الجسم ، g تسارع الجاذبية* . وحدات طاقة الوضع هى نفس وحدات الشغل ، أى جول أو ارج أو قدم — باوند كما يمكنك أن تتأكد من المعادلة (٥ — ٥) . لاحظ فى المعادلة (٥ — ٥) أن h هو الفرق بين الارتفاعين ، وهو يمثل المسافة التى ارتفعها الجسم فوق مستوى مرجعى معين .

وفيما يتعلق بهذه الحقيقة ،من الضرورى أن نذكر حقيقة هامة أخرى عن طاقة الوضع ، ويمكن صياغتها بالطريقة التالية :

المستوى الصفرى لحساب طاقة الوضع اختيارى .

فمثلا يعتبر اختيار الوضع الذى يقاس ارتفاع الجسم بالنسبة اليه مسألة اختيار شخصى بحت . فقد يقول شخص ما أن الجسم يقع على ارتفاع قدره 50 cm من سطح المنضدة وبالتالى فان ارتفاعه هو 50 cm . وقد يقول شخص آخر انه حيث أن سطح المنضدة يقع على ارتفاع 90 cm من الأرضية فان ارتفاع الجسم هو 140 cm . وقد يقول شخص ثالث أن موضع الجسم يقع على بعد 60 cm تحت سقف الغرفة .

---

* g لاتساوى $9.8\ m/s^2$ فى المواضع التى تقع على ارتفاع كبير من سطح الأرض . فى هذه الحالة لاتكون طاقة الوضع مساوية للمقدار mgh .

بالنسبة لهذا الشخص يكون الارتفاع هو 60 cm— وجميع الاختيارات الأخرى ممكنة وصحيحة . كما سنرى فان الحسابات تتعلق فقط بالتغيرات فى طاقة وضع الأجسام . وتسمح لنا هذه الحقيقة بأن نأخذ المستوى الصفرى لطاقة الوضع فى أى مكان مناسب .

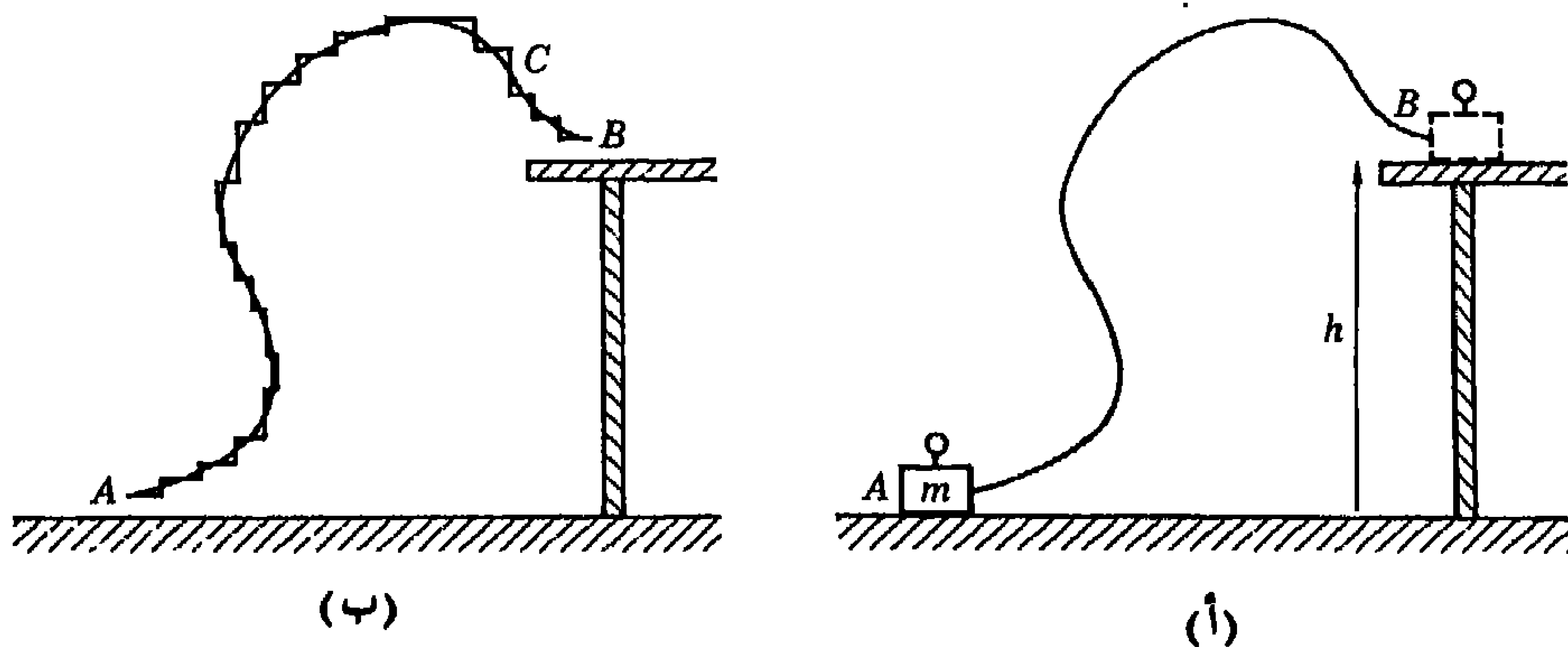
٥ – ٥ قوة الجذب هى قوة احتفاظية

لقد رأينا فيما سبق مواقف عديدة يبذل الشغل فيها لرفع الجسم . ولكى يرتفع الجسم رأسيا الى أعلى بسرعة ثابتة نحتاج الى قوة تساوى وزن الجسم mg ، وكنتيجة لذلك فان الشغل المبذول فى رفع الجسم رأسيا الى أعلى مسافة قدرها h هو (mg) h . وسنثبت الآن أنه حتى اذا لم يرفع الجسم رأسيا الى أعلى فان نفس النتيجة ستظل صحيحة .

لنفرض أننا نريد رفع الكتلة الموضحة فى شكل ٥ – ١٠ أ من الأرضية الى المنضدة . ماهو الشغل الذى يجب بذله لتحقيق ذلك ؟ لنرفع الجسم على طول المسار الموضح بالخط الاسود من A الى B .

لحساب الشغل المبذول فى رفع الكتلة من A الى B يمكننا تقريب المسار الفعلى الى المسار المسنن الموضح فى الجزء ب من الرسم . وبجعل اطوال الأسنان صغيرة جدا يمكن جعل المسارين متماثلين لجميع الأغراض العملية . لاحظ أن القوى الرافعة رأسية . وعليه فانها لاتبذل أى شغل فى الحركات الافقية الصغيرة للمسار المسنن* بينما يبذل الشغل بواسطة القوة الرافعة فى الحركات الرأسية فقط . وعندما يرفع الجسم فإن الشغل المبذول يكون موجبا . ولكن عندما يخفض (قرب النقطة C) فإن الشغل المبذول يكون سالبا . وتأثير ذلك هو أن الحركات الرأسية الى أسفل تلاشى الشغل المبذول أثناء الحركات الرأسية المكافئة الى أعلى .

شكل (٥ – ١٠)
يمكن تقريب المسار فى (أ) بسلسلة من الخطوات الافقية والرأسية كما هو موضع فى (ب) .



*تذكر أن قوة صغيرة جدا يمكن اهمالها تلزم لحدوث الحركة الأفقية .

نستنتج من ذلك اذن أن الشغل يعتمد فقط على محصلة التأثير لجميع الحركات الرأسية . وعند رفع الجسم من A الى B فانه يكون قد ارتفع مسافة صافية قدرها h ونتيجة لذلك فان الشغل المبذول يكون mgh .

ولكن هذا الشغل هو نفس الشغل المبذول لرفع الجسم رأسيا من A مسافة قدرها h ثم تحريكه جانبيا الى النقطة B.وفى الحقيقة ، حيث أن المسار الموضح من A الى B اختيارى تماما ، ويمكننا أن نستنتج مايلى :-

اذا كانت النقطة A تقع على مسافة قدرها h تحت النقطة B فإن الشغل المبذول ضد الجاذبية لرفع الكتلة m من A الى B هو mgh . وهذه النتيجة صحيحة بالنسبة لأى مسار يؤخذ بين A و B .

وبالطبع ، اذا خفض الجسم من النقطة B الى النقطة A فان الشغل المبذول ضد الجاذبية سيكون $-mgh$.

تعريف القوة الاحتفاظية

تعتبر قوة الجذب مثالا **للقوة الاحتفاظية** . ويقال ان القوة احتفاظية اذا كان الشغل المبذول فى تحريك الجسم من النقطة A الى النقطة B ضد القوة لايعتمد على مسار الحركة . وسنرى فيما بعد أن القوى الاستاتية الكهربائية والنووية هى أيضا قوى احتفاظية . ومن ناحية اخرى فان قوى الاحتكاك ليست احتفاظية ويمكنك التحقق من ذلك بسهولة بأن تزلق كتابك من نقطة الى اخرى على المنضدة. ومن الواضح أنك ستضطر الى بذل شغل اكبر عندما تزلقه فى مسار معقد طويل عنه فى حالة ماذا اتبعت مسارا مستقيما قصيرا.وهذا لايمكن ان يحدث اذا كانت قوة الاحتكاك احتفاظية .

٥ - ٦ التحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع

فى كل مرة تقذف فيها جسما فى الهواء أو تسقطه فانك ترى مثالا للتحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع . فمثلا ، عندما تقذف قطعة عملة معدنية الى أعلى كما هو مبين فى شكل ٥ - ١١ فان طاقة حركتها الابتدائية تتحول الى طاقة وضع ، وهذا صحيح كميا كما سنثبت الآن .

فى اللحظة التى تترك فيها قطعة العملة يدك تكون لها سرعة الى أعلى قدرها v_0 .

بعد ذلك ترتفع قطعة العملة الى ارتفاع قدره h حيث تصبح سرعتها صفرا . لايجاد h يمكننا استخدام العلاقة :

لنحصل على

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

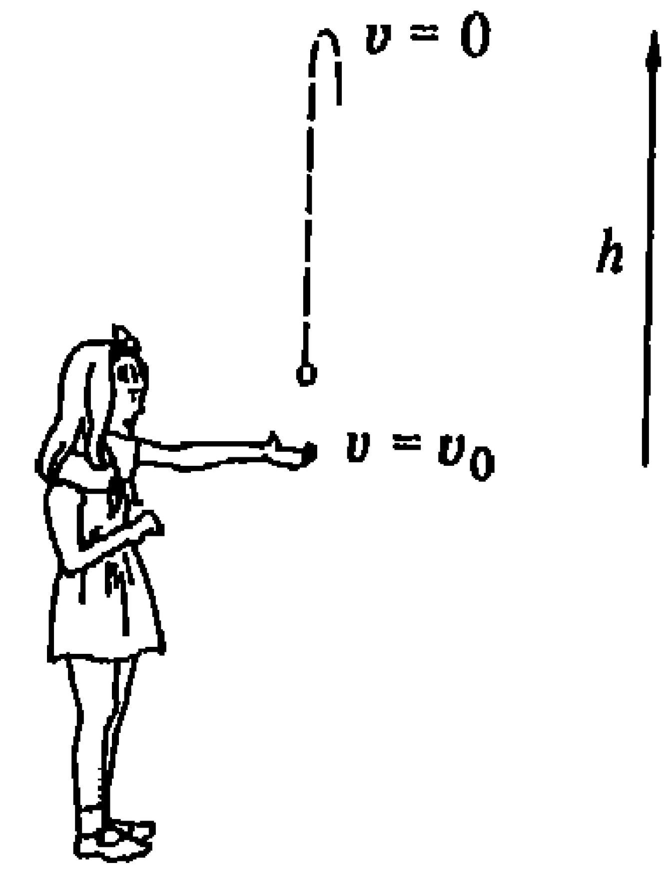
$$0 - v_0^2 = -2gh$$

ومنه نجد أن $h = v_0^2/2g$. ولكن طاقة وضعها عند هذا الارتفاع h تساوى mgh. وبالتعويض عن قيمة h، نحصل على :

$$mgh = mg\frac{v_0^2}{2g} = \tfrac{1}{2}mv_0^2$$

وكما نرى ، فان طاقة الحركة الابتدائية لقطعة العملة قد تحولت الى طاقة وضع عندما ارتفعت قطعة العملة . لاحظ أن طاقة الحركة المفقودة قد استغلت فى عمل كمية مكافئة من الشغل ضد قوة الجذب .

وبنفس الطريقة يمكننا اثبات أن السقوط اللاحتكاكى لجسم يكسبه طاقة حركة مساوية لطاقة وضعه المفقودة . وهذه نتيجة عامة . وقبل صياغة هذه النتيجة ، مع ذلك ، سنحاول تعميمها لتتضمن تأثيرات القوى الأخرى . فمثلا ، يمكن أن تؤثر قوى الاحتكاك على الجسم بالاضافة الى قوة الجاذبية . كذلك فإن بعض القوى الخارجية قد تنتج قوة محصلة مؤثرة على الجسم . ماهو الصحيح فى تلك الحالات ؟



شكل (٥ - ١١)
تتحول طاقة حركة قطعة العملة الى طاقة وضع عندما ترتفع قطعة العملة . وعندما تسقط تتحول طاقة الوضع مرة ثانية الى طاقة حركة

رأينا سابقا أن طاقة الحركة وطاقة الوضع يمكن أن تفقد فى بذل الشغل . كذلك فإن جسما متحركا بسرعة كبيرة يمكنه أن يبذل شغلا عند إبطاء حركته . فاذا أخذنا جسما كالمبين فى شكل ٥ - ٩ فسنجد أنه يبذل شغلا عندما يسقط . وفى كل من هذه الحالات تكون الطاقة المفقودة مساوية للشغل المبذول . يوجد ايضا موقف مشابه عندما تسبب قوة خارجية تسارع الجسم أو رفعه . عندئذ تكون طاقة الحركة أو طاقة الوضع مساوية للشغل المبذول بواسطة القوة الخارجية .

ويمكن تلخيص جميع هذه النتائج كما يلى :—

$$\text{Loss in KE} + \text{loss in PE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

نظرية الشغل والطاقة

حيث تمثل الحروف inc و dec الزيادة والنقص على الترتيب . **وهذه العبارة هى** احدى صور نظرية الشغل والطاقة . فى هذه العلاقة تمثل Wdec مجموع كل أنواع الشغل المبذول على الجسم والتى تسبب نقص طاقة الحركة وطاقة الوضع للجسم . وفى كثير من الأحيان تكون هذه الكمية هى الشغل المبذول بواسطة قوى الاحتكاك والقوى الاخرى التى تحاول تقليل سرعة حركة الجسم . كذلك فإن الكمية Winc هى مجموع كل أنواع الشغل التى تسبب زيادة طاقة حركة وطاقة وضع

الجسم . وعموما فإن الشغل المبذول بواسطة القوى التى ترفع الجسم أو تسبب زيادة سرعة حركة الجسم محتوى هنا . وهذا الحد مسبوق بإشارة سالبة لأنه يسبب زيادة طاقة الجسم بدلا من نقصها . وعند كتابة كل من هذين الحدين لايجب أن نضيف الشغل المبذول بواسطة قوة الجذب لأن هذا الشغل مأخوذ بالفعل فى الاعتبار فى حد طاقة الوضع فى الطرف الايسر للمعادلة .

تعتبر نظرية الشغل والطاقة صيغة لحقيقة أن الشغل والطاقة يمكن تقديرهما . فعندما تتغير طاقة حركة الجسم أو طاقة وضعه فإن هذا التغير لابد أن يكون نتيجة لكمية مكافئة من الشغل المبذول . ونظرية الشغل والطاقة هى أساسا معادلة اتزان تبين أن هذه الكميات يجب أن تتزن كل منها مع الاخرى .

ويمكن صياغة هذه النظرية بالرموز بالطريقة التالية ، بشرط أن نتذكر أن الفاقد فى كمية معينة يساوى القيمة الإبتدائية مطروحا منها القيمة النهائية :

معادلة الشغل والطاقة

$$(\tfrac{1}{2}mv_0^2 - \tfrac{1}{2}mv_f^2) + (mgh_0 - mgh_f) = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}} \quad (٥ - ٦)$$

لاحظ مرة اخرى ان حدى الشغل لايحتويان على الشغل المبذول بواسطة قوة الجذب لأن هذا الشغل مأخوذ فى الاعتبار فى حد طاقة الوضع . لنحاول توضيح استخدام نظرية الشغل والطاقة بمساعدة بعض الأمثلة .

مثال توضيحى ٥ – ٧ . سقط جسم كتلته 3.0 kg مسافة قدرها 4.0 m.ماهى سرعة حركته قبل أن يصطدم بالأرض مباشرة ؟

طريقة الحل . يمكننا حل هذه المسألة باستخدام معادلات الحركة . المعطيات :

$$a = 9.8\ \text{m/s}^2 \qquad \text{(down positive)}$$
$$v_0 = 0 \qquad s = 4.0\ \text{m} \qquad v_f = ?$$

وحيث أن :

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

فإن :

$$v_f^2 = (2)(9.8\ \text{m/s}^2)(4\ \text{m})$$

ومنه نجد أن :

$$v_f = 8.85\ \text{m/s}$$

الطريقة ٢ : من نظرية الشغل والطاقة (معادلة (٥ – ٦)) حيث أن قوة الجاذبية فقط هى التى تعمل ، نجد أن :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{\text{dec}} - \text{work}_{\text{inc}}$$

ومنه :

$$mg(h_1 - h_2) + \tfrac{1}{2}m(v_0^2 - v_f^2) = 0$$

وبالتعويض عن $h_1 - h_2$ بالمقدار 4.0 m ووضع $v_0 = 0$ نحصل على :

$$(9.8\ \text{m/s}^2)(4.0\ \text{m}) + \tfrac{1}{2}(0 - v_f^2) = 0$$

بحل هذه المعادلة بالنسبة الى v_f نجد أن $v_f = 8.85\ \text{m/s}$

لاحظ أننا لم نحتاج الى كتلة الجسم .

مثال توضيحى ٥ – ٨ لنفرض أن الجسم فى المثال السابق كان يتحرك بسرعة قدرها 6.0 m/s فقط قبل الإصطدام مباشرة . ماهو متوسط قوة الإحتكاك المؤثرة على الجسم ؟

طريقة الحل . لاحظ أنه من الضرورى الآن أن نأخذ فى الإعتبار الشغل المبذول بواسطة قوى الإحتكاك . وفى هذه الحالة يكون الجسم قد تحرك 4.0 m ضد متوسط قوة الاحتكاك f ، وعليه فإن الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك يساوى $4.0f$ Joules .

ومن نظرية الشغل والطاقة (حيث أن الإحتكاك ينقص من طاقة الجسم) نجد أن :

Loss in PE + loss in KE = friction work

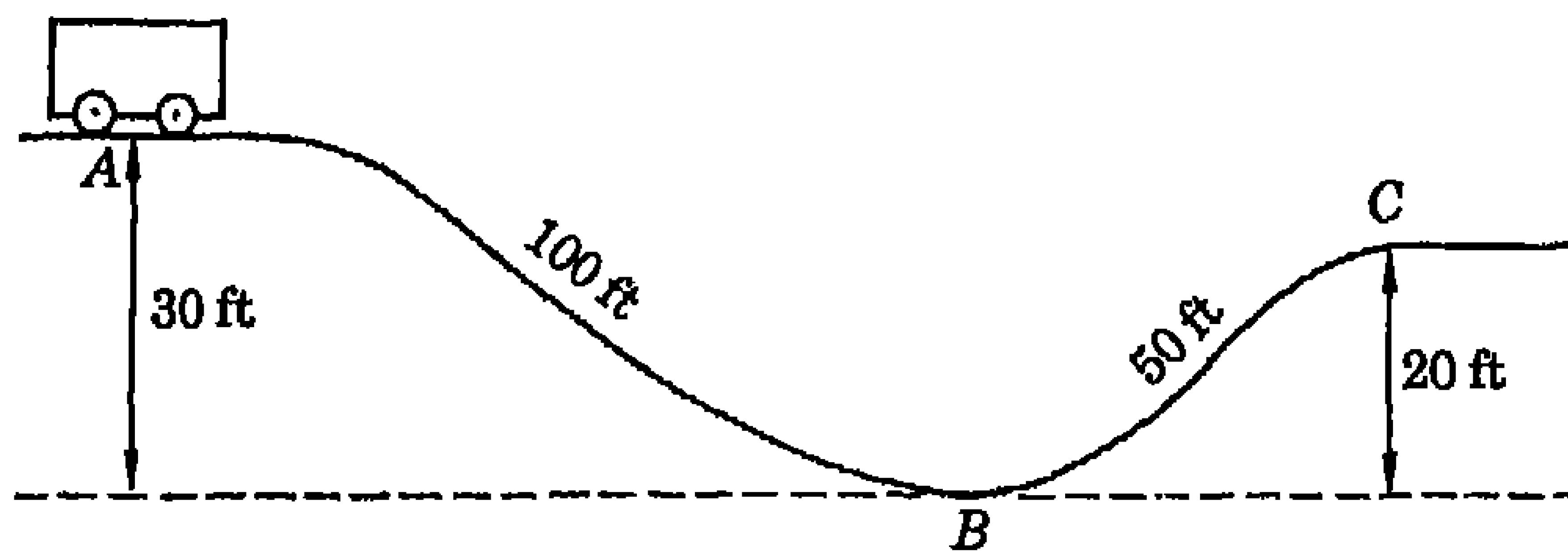
وبالتعويض نحصل على :

$$mg(h_1 - h_2) + \tfrac{1}{2}m(v_0^2 - v_f^2) = \text{friction work}$$

أو : $(3.0\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(4.0\ \text{m}) - \tfrac{1}{2}(3\ \text{kg})(36\ \text{m}^2/\text{s}^2) = (4.0\ \text{m})f$

لاحظ أن كتلة الجسم لم تختصر فى هذه الحالة . وبحل المعادلة السابقة بالنسبة الى f نجد ان $f = 16\ \text{N}$.

مثال توضيحى ٥ – ٩ . عربة من عربات الافعوانية* وزنها 640 lb تبدأ من السكون عند النقطة A فى شكل ٥ – ١٢ ثم تبدأ فى الهبوط تلقائيا على القضبان . فإذا كانت قوة الاحتكاك 5.0 lb ، فما هى سرعة حركة العربة عند النقطة B ؟ وماهى سرعتها عند النقطة C ؟



شكل (٥ – ١٢)
عندما تتحرك العربة الى النقطتين B ثم C تتحول طاقة وضعها عند A جزئيا على الأقل الى طاقة وشغل ضد قوى الاحتكاك .

*الافعوانية (roller coaster) سكة حديد مرتفعة (فى مدينة الملاهى) تتلوى وتنخفض وتجرى فوق قضبانها عربات صغيرة .

طريقة الحل . فى هذه الحالة يمكن كتابة نظرية الشغل والطاقة على الصورة :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{friction work}$$

وبتطبيق هذه العلاقة على الحركة من A الى B :

$$mg(h_A - h_B) + (0 - \tfrac{1}{2}mv_B^2) = (f)(100 \text{ ft})$$

ومنه نجد أن :

$$(640 \text{ lb})(30 \text{ ft}) - \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{640 \text{ lb}}{32 \text{ ft/s}^2}\right)v_B^2 = (5 \text{ lb})(100 \text{ ft})$$

وعليه فإن $v_B = 43$ ft/s . وبالنسبة الى الحركة من A الى C تتحول معادلة الشغل والطاقة الى الصورة :

$$mg(h_A - h_c) + (0 - \tfrac{1}{2}mv_c^2) = (f)(150 \text{ ft})$$

وحيث أن $h_A - h_c = 10$ ft ، يمكننا حل المعادلة السابقة لنجد أن $v_c = 24$ ft/s .

مثال توضيحى ٥ – ١٠ : يمثل الشكل ٥ – ١٣ سيارة كتلتها 2000 kg وسرعتها عند النقطة A حيث بدأت الانسياب هى 20 m/s . وعندما وصلت السيارة الى النقطة B اصبحت سرعتها 5.0 m/s . ماهو متوسط قوة الاحتكاك التى تعوق ، وبفرض أن قوة الاحتكاك ثابتة ، ماهى المسافة التى تقطعها السيارة بعد النقطة B قبل أن تتوقف؟

طريقة الحل . نعلم من نظرية الشغل والطاقة أن :

$$(\text{PE at } A - \text{PE at } B) + (\text{KE at } A - \text{KE at } B) = \text{friction work}$$

أو :

$$mg(h_A - h_B) + \tfrac{1}{2}m(v_A^2 - v_B^2) = fs$$

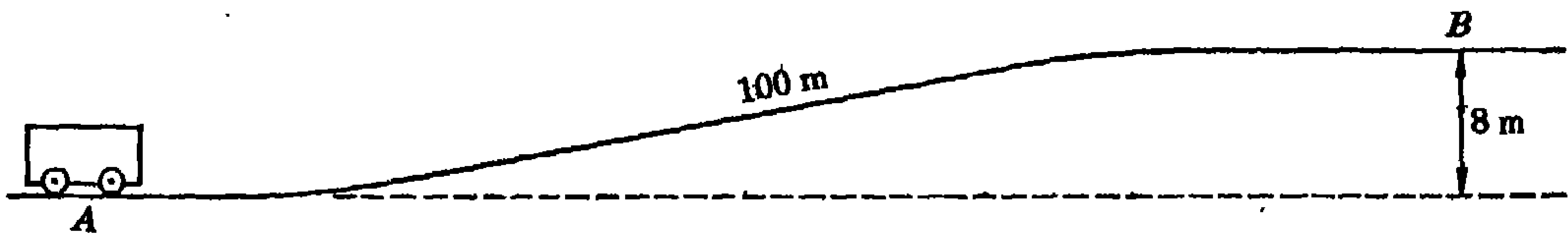
وبالتعويض عن الكميات المختلفة ووضع $h_A - h_B = -8$ m نجد أن :

$$(2000 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(-8 \text{ m}) + \tfrac{1}{2}(2000 \text{ kg})(375 \text{ m}^2/\text{s}^2) = (f)(100 \text{ m})$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة الى f نحصل على $f = 2180$ N

لنطبق الآن نفس الطريقة على الحركة من النقطة B إلى نقطة التوقف . حيث أن كلتا النقطتين تقعان على نفس الإرتفاع فلن يكون هناك تغير فى طاقة الوضع ، لذلك فإن :

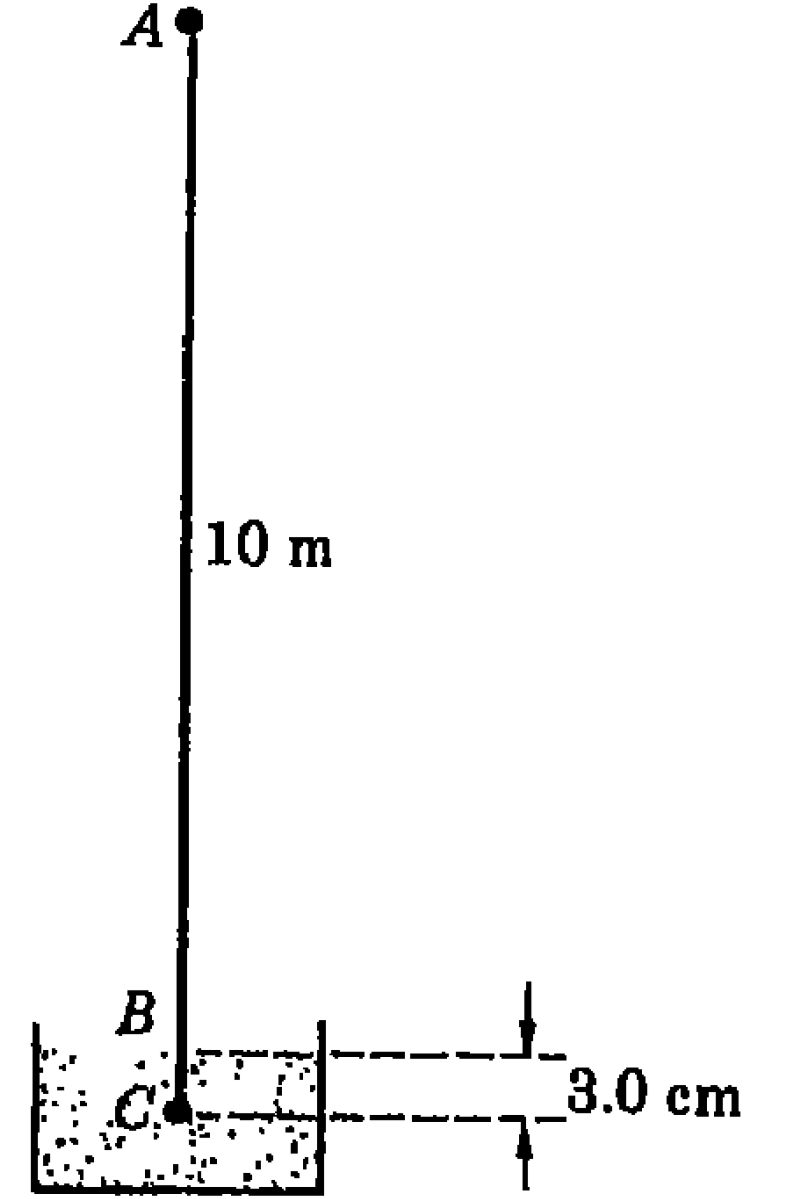
$$0 + \tfrac{1}{2}m(v_B^2 - 0) = fd$$



شكل (٥ – ١٣) تتحول طاقة حركة السيارة عند A جزئيا الى طاقة وضع وشغل ضد قوى الاحتكاك أثناء حركتها الى النقطة B .

حيث d هى المسافة من B إلى نقطة التوقف . وبالتعويض عن القيم المعلومة نجد أن $d = 11.5$ m .

مثال توضيحى ٥ – ١١ : جسم صغير كتلته 2 kg يسقط من ارتفاع قدره 10m فى صندوق مليء بالرمل (أنظر شكل ٥ – ١٤) ويصل هذا الجسم الى السكون على مسافة 3.0 cm تحت سطح الرمل . ماهى قيمة متوسط القوة التى يؤثر بها الرمل على الجسم ؟



شكل (٥ – ١٤)
تفقد طاقة وضع الكرة متحولة الى شغل احتكاك فى خلال الزمن الذى تصل فيه الكرة الى السكون عند النقطة C .

طريقة الحل . يلاحظ ان طاقة الوضع عند A قد تحولت بأكملها الى طاقة حركة عند B ، ثم فقدت طاقة الحركة هذه متحولة الى شغل احتكاك اثناء نفاذ الجسم فى الرمل الى C.لنطبق نظرية الشغل والطاقة على العملية كلها من A الى C،حيث أن KE = 0 عند هاتين النقطتين ، اذن :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{dec} - \text{work}_{inc}$$

تصبح :

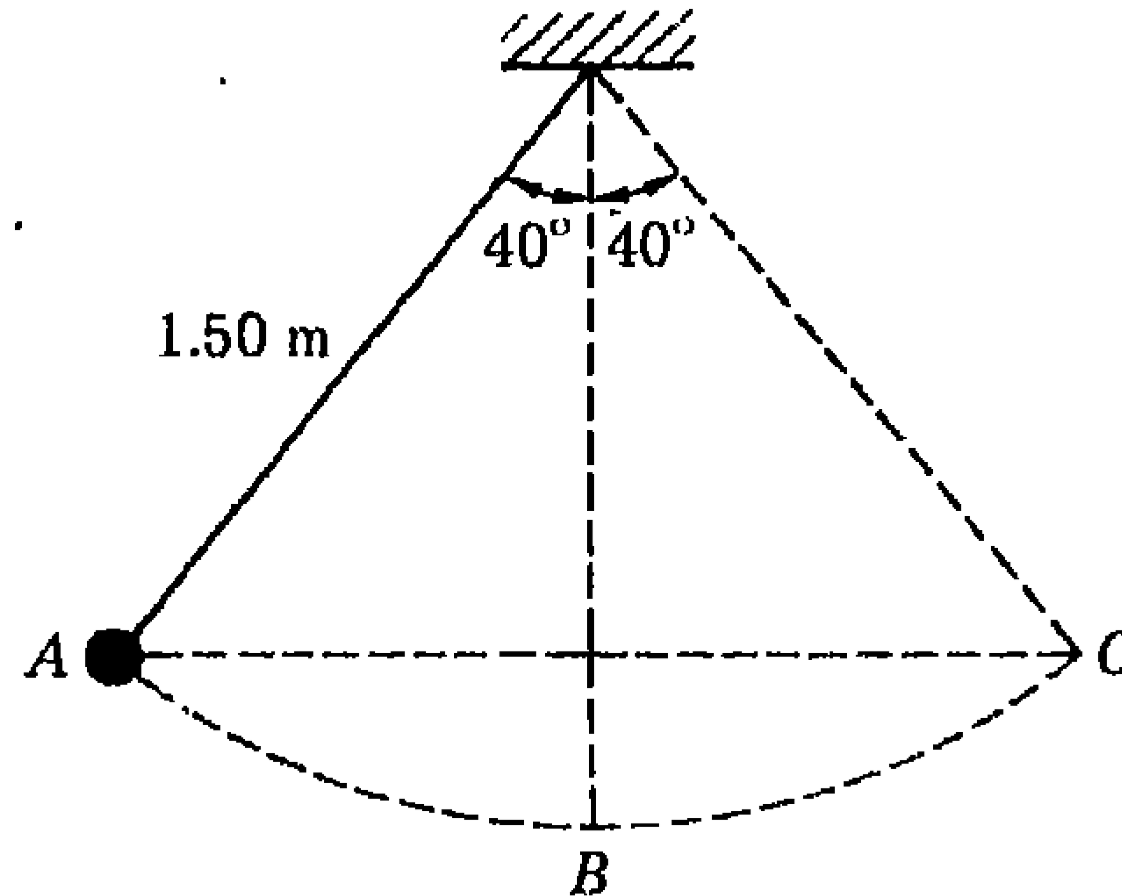
$$mg(h_A - h_C) + 0 = fs - 0$$

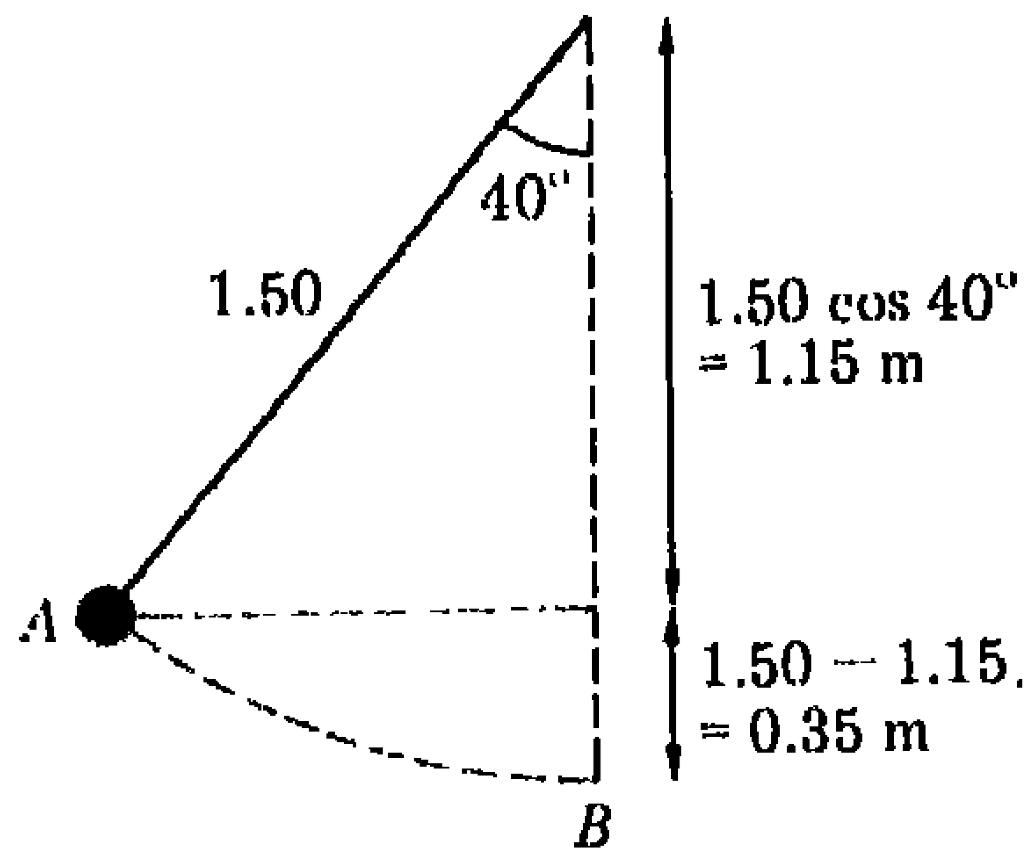
حيث $h_A - h_C = 10$ m ، $s = 0.030$ m . وباستخدام هذه القيم نجد أن $f = 6500$ N .

مثال توضيحى ٥ – ١٢ . تأمل البندول (كرة معلقة فى نهاية خيط) الموضح فى شكل ٥ – ١٥ أ . يبدأ البندول الحركة من السكون عند النقطة A ثم يترك حرا . بأى سرعة تتحرك الكرة عند النقطة B ؟ وبأى سرعة تتحرك عند النقطة C ؟

طريقة الحل . عندما تسقط الكرة من A الى B فانها تفقد طاقة الوضع . وفى هذه العملية تزداد سرعة الكرة . ويلاحظ من هذا أن جزءا على الاقل من طاقة الوضع قد تحول الى طاقة حركة . وحيث أن الشد فى الخيط يتجه عموديا على القوس الذى تتحرك الكرة عليه فإن مركبة هذه القوة فى اتجاه الحركة تساوى صفرا . وعليه فإن الخيط لايبذل شغلا على الكرة . وبإهمال الإحتكاك يمكننا القول أن الشغل يبذل على الكرة بواسطة قوة الجذب فقط .

تبين لنا نظرية الشغل والطاقة ان :





شكل (٥ – ١٥)
عندما يتأرجح البندول ذهابا وايابا فان طاقة الحركة تتحول الى طاقة وضع وبالعكس .

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{dec} - \text{work}_{inc}$$

وقد وجدنا آنفا أن حد الشغل يساوى صفرا . بالإضافة الى ذلك فإن فاقد طاقة الوضع هو mgh ، حيث m كتلة الكرة و h فرق الارتفاع بين النقطتين A ، B.من شكل ٥ – ١٥ ب نرى أن $h = 0.35$ m . وعليه فإن المعادلة السابقة تصبح :

$$m(9.8 \text{ m/s}^2)(0.35 \text{ m}) + (\tfrac{1}{2}mv_0^2 - \tfrac{1}{2}mv_f^2) = 0$$

ولكن السرعة الإبتدائية للكرة v_0 تساوى صفرا . وعليه فإن المعادلة تصبح :

$$m(3.43 \text{ m}^2/\text{s}^2) - \tfrac{1}{2}mv_f^2 = 0$$

وبقسمة طرفى المعادلة على كتلة الكرة يمكننا حلها بالنسبة الى v_f لنجد أن $v_f = 2.6$ m/s وهذه هى سرعة الكرة عندما يمر البندول بالنقطة B .

اما الموقف عند النقطة C فانه سهل جدا . عندما تصل الكرة إلى النقطة C تكون قد اكتسبت طاقة وضعها الأصلية . وبناء على ذلك فإن طاقة الحركة عند النقطة C تساوى صفرا ، ويمكننا اثبات ذلك بتطبيق نظرية الشغل والطاقة على الكرة عند النقطتين A و C عندئذ تتحول المعادلة :

$$\text{Loss in PE} + \text{loss in KE} = \text{work}_{dec} - \text{work}_{inc}$$

إلى الصورةالتالية (لأن قوة الجذب فقط هى التى تبذل شغلا على الكرة) :

$$0 + \text{loss in KE} = 0$$

وبتعبير آخر يمكننا القول أن طاقة الحركة واحدة عند النقطتين A و C،وحيث أن الكرة قد كانت فى حالة السكون عند النقطة A فإنها تكون أيضا فى حالة السكون عند النقطة C .

وكما سنرى فيما بعد ، يعتبر البندول مثالا مثيرا للتحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع . ومرة ثانية تتحول طاقة الحركة الى طاقة وضع وبالعكس عندما يتحرك البندول ذهابا وايابا . وفى أى نقطة من مسار الحركة تكون طاقة الوضع المفقودة نتيجة للسقوط من النقطة A قد تحولت الى طاقة حركة . وبالطبع فإن هذا مبنى على أساس أن قوة الإحتكاك مهملة .

مثال توضيحى ٥ – ١٣ . ماهى القوة اللازمة لتسارع سيارة كتلتها 2000 kg من السكون إلى سرعة قدرها 15.0 m/s فى مسافة قدرها 80 m ؟ . إفترض أن متوسط قوة الإحتكاك التى تعاكس الحركة هو 500 N .

طريقة الحل . نفرض فى هذه الحالة أن السيارة تتحرك على أرض مستوية بحيث يكون التغير فى طاقة الوضع مساويا للصفر . عندئذ يمكن كتابة نظرية الشغل والطاقة على الصورة التالية :

$$0 + (\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_f^2) = \text{friction work} - \text{work done by accelerating force}$$

لاحظ أن قوةالتسارع (ولنرمز لها بالرمز F) تسبب زيادة فى طاقة حركة السيارة ، لذلك فإنها تتبع حد الشغل W_{inc} ، وكالعادة ، فإن قوة الإحتكاك تتبع حد الشغل W_{dec} لأنها تسبب نقص طاقة حركة الجسم . وبوضع $v_0 = 0$ ، $v_f = 15$ m/s ، $m = 2000$ kg ، $s = 80$ m تتحول هذه المعادلة الى الصورة :

$$-\frac{1}{2}(2000\text{ kg})(15\text{ m/s})^2 = (f)(80\text{ m}) - (F)(80\text{ m})$$

حيث f هى قوة الاحتكاك وتساوى 500 N.وبالتعويض عن قيمة f فى المعادلة السابقة وحلها بالنسبة الى F سنجد أن قوة التسارع تساوى حوالى 3300 N .

٥ - ٧ بقاء الطاقة

فى هذا الفصل تعرفنا على مفهوم الطاقة أى القدرة على بذلك الشغل.وكما رأينا فإن طاقة الحركة تمثل الشغل الذى يمكن أن يبذله الجسم بسبب حركته . كذلك فإن طاقة الوضع التثاقلية تمثل الشغل الذى يمكن أن يبذله الجسم بسبب موضعه .

هناك أنواع اخرى من الطاقة بالاضافة الى هذين النوعين . فالسلك الزنبركى (الممدود) يستطيع بذل الشغل ، لذلك فان له طاقة ايضا . والبطارية الموجودة فى سيارتك تستطيع إدارة بادىء التشغيل وعليه فإنها تحتوى على طاقة هى الطاقة الكيميائية . والغاز الساخن فى غرفة احتراق مكبس السيارة يمكنه أن يدفع الكباس الى الخارج مسببا حركة السيارة. لذلك فإن للغاز طاقة هى الطاقة الحرارية . هناك ايضا صور اخرى للطاقة ذات طبيعة كهربائية أو نووية . وكما ترى فان الطاقة توجد على صور كثيرة . وسنرى فيما بعد أن الكتلة نفسها هى إحدى صور الطاقة .

يوصف سلوك الطاقة بقانون فى غاية الأهمية ، وهو يسمى قانون بقاء الطاقة وينص هذا القانون على أن :

قانون بقاء الطاقة

الطاقة لاتستحدث ولاتفنى . واذا حدث نقص فى احدى صور الطاقة فلابد ان تحدث زيادة فى الصور الأخرى للطاقة .

لاحظ أن هذا القانون لاينص على بقاء طاقة الحركة أو بقاء طاقة الوضع أو حتى بقاء مجموع طاقتى الحركة والوضع ..إذ أن فاقدى طاقة الحركة وطاقة الوضع يمكن أن يؤديا إلى كسب فى كثير من صور الطاقة الاخرى .

تعتبر الحالة التى تفقد فيها طاقة الحركة فى بذل شغل الإحتكاك احدى اهم الحالات التى تفقد فيها طاقة الحركة . أين تذهب طاقة الحركة فى مثل هذا الموقف ؟ لابد ان تظهر هذه الطاقة فى صورة اخرى ، وهى بالفعل تظهر فى صورة طاقة حرارية . وأنت تعلم بالتأكيد كثيرا من الأمثلة التى يؤدى فيها شغل الإحتكاك الى تأثيرات حرارية . فمثلا ، اذ لم يشحم كرسى التحميل فإن ذلك يؤدى الى تسخينه . كذلك فان الهندى الامريكى كان يشعل النار عندما يدعك قطعتين من الخشب احداهما فى الأخرى . وأيضا فإن جلدك يعانى حرقا أرضيا عندما تنزلق من غير قصد على أرضية حجرة الألعاب الرياضية . وعموما فهناك كثير من الطرق التى يؤدى فيها شغل الإحتكاك إلى ظهور الحرارة ، باستثناء حالات قليلة . والحقيقة الهامة هى أنه :

عندما يبذل شغل الاحتكاك فان كمية مكافئة من الطاقة الحرارية سوف تتولد .

وكنتيجة لذلك ، عندما تفقد الصور الاخرى للطاقة فى بذل شغل الإحتكاك فإن كمية مكافئة من صورة أخرى من الطاقة سوف تكتسب ، فالطاقة لاتستحدث ابدا ولاتفنى ابدا .

من السمات الهامة لقانون بقاء الطاقة تلك السمة المتعلقة بمكنات الحركة الدائمة . فمثلا ، قد يقترح بعض المخترعين من آن الى آخر تصميما لمكنة الحركة الدائمة . وقد تكون هذه آلية عبقرية . تلك التى يقترح المخترع أنها ستدير السيارة إلى الأبد بدون وقود أو ، بتعبير أكثر دقة ، قد تكون هذه عبارة عن مكنة تستخدم الوقود للبدء ولكنها تولد القدرة فى داخلها . وقد يدعى المخترع أن هذه المكنة تولد كمية من الطاقة كافية لتحفظها دائرة وقادرة على بذل الشغل بالإضافة إلى ذلك .

وإذا كنا على علم بقانون بقاء الطاقة يمكننا أن نقول بدون تفكير اكثر إن هذه المكنات لن تعمل . ومهما كانت هذه المكنات معقدة لن تستطيع أن تخلق الطاقة . فإذا فقدت هذه المكنات الطاقة بأية طريقة ، بالاحتكاك أو ببذل الشغل ، سيكون من الضرورى امداد المكنة بالطاقة من مصدر داخلى أو خارجى . وحيث أن أية مكنة تحتوى على قدر ما من الإحتكاك ، فإنها لن تدور إلى الأبد مالم تمد بالطاقة من مصدر آخر .

هناك كثير من التطبيقات المثيرة الأخرى لقانون بقاء الطاقة وهو قانون هام جدا ينطبق انطباقا واسعا فى جميع فروع العلم وسنستخدم نحن هذا القانون فى كثير من الأحيان أثناء دراستنا لعلم الفيزياء .

٥ - ٨ رصيد طاقة الأرض

من المعلوم جيدا أن سكان الأرض قلقون على مصدر طاقة الأرض . وحيث أن الطاقة محفوظة ، يمكننا أن نفترض أن المشاكل تنبع من استخداماتنا المتزايدة للطاقة . ومع ذلك فإن هذا ليس صحيحا إذ أن نقص الطاقة المحتمل فى المستقبل ،سيحدث حتى إذا واصلنا استخدام الطاقة بنفس المعدل الحالى . ذلك لأن المشكلة تتعلق بنفع الطاقة الموجودة على الأرض وليس فقط بكمية الطاقة الموجودة عليها .

سيناقش موضوع نفع الطاقة بتفصيل أكثر فى الفصل الثانى عشر ولكن تكفينا الآن بعض الأمثلة لتوضيح المشكلة الأساسية . لنأخذ حالة بسيطة وهى احتراق الفحم أو النفط أو البنزين لتوليد بخار الماء الذى يستخدم بدوره فى توليد الكهرباء . عند احتراق الوقود يتحول جزء صغير من الطاقة الكيميائية فى الفحم الى طاقة كهربائية . أما الجزء الأكبر من الطاقة الحرارية الناتجة عن الإحتراق فإنه يتصاعد خلال المدخنة مع نتائج الاحتراق . كذلك فإن هناك مفقودات أخرى من الطاقة الحرارية . وفى الحقيقة ، كما سنرى فى الفصل الثانى عشر من المستحيل حتى من الناحية النظرية تحويل حرارة الاحتراق بأكملها الى شغل نافع . ونتيجة لذلك يمكننا القول أن طاقة الوقود ليست صالحة بأكملها للاستعمال .

لنأخذ مثالا آخر لتوضيح هذه الظاهرة . لنفرض أنك اعطيت كتابا طاقة حركة وذلك بدفعه على المنضدة . (يمكنك فى هذه الحالة أن تعتبر أن هذه الطاقة قد أتت منك وأنك قد حصلت عليها من الطعام الذى أكلته) . عندئذ سيفقد الكتاب هذه الطاقة بسرعة بسبب شغل الاحتكاك لتظهر كطاقة حرارية فى صورة تسخين لسطحى الإنزلاق ،أى أن طاقة الحركة الابتدائية قد تحولت الى صورة اخرى من الطاقة ولكن هذه الطاقة الجديدة أقل نفعا من طاقة الحركة الإبتدائية للكتاب . وهذه ظاهرة واسعة الإنتشار فى الطبيعة تتحول الطاقة من صورة نافعة الى صورة أقل نفَعا — ولهذا السبب فإن طاقة الأرض تصبح اقل نفعا بمرور الزمن بالرغم من أن كمية الطاقة الكلية لاتقل كثيرا .

وفى الحقيقة ، ربما تكون كمية الطاقة الموجودة على الأرض متزايدة باستمرار بسبب الطاقة الآتية اليها من الشمس ، ولكنها بالتأكيد لاتتناقص .

هناك مصدران رئيسيان لطاقة الأرض ، وقد وجد احدهما فى السنوات المبكرة عندما كانت الأرض فى بداية تكونها حينما كانت العناصر الموجودة على الأرض فى طور التكوين . ونظرا لأن هذه الطاقة محبوسة فى ذرات وأنوية هذه العناصر فإنها تعرف باسم **الطاقة النووية** ، وتستخدم هذه الطاقة فى

المفاعلات النووية . وقد بدأ استخدام هذا المصدر على نطاق واسع فى الآونة الأخيرة فقط . ومن المأمول أن يمدنا هذا المصدر بجزء كبير من الطاقة اللازمة لاحتياجاتنا لقرون عديدة قادمة ، ويعتمد ذلك على الانجازات التكنولوجية فى المستقبل . (وهو أيضا مصدر الحرارة الموجودة فى اعماق الأرض والتى تعتبر اساسية فى عمل مصادر الطاقة الحرارية الأرضية) .

أما المصدر الاساسى الثانى لطاقة الأرض فهو الشمس . وتأتى كل الطاقة الحالية تقريبا من المصدر ، فالنفط والفحم والبنزين ماهى الا نواتج تحلل المادة النباتية التى تنمو فى ضوء الشمس مستمدة منه الطاقة النافعة . ونحن نبدأ الآن استخدام ضوء الشمس مباشرة فى التسخين الشمسى والخلايا الشمسية لانتاج الكهرباء .

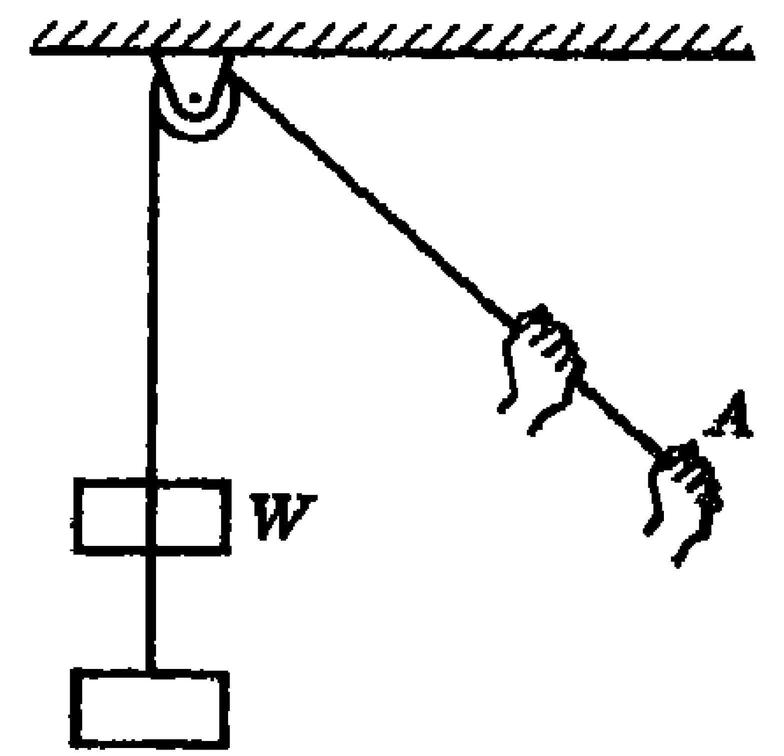
وحتى الطاقة التى نحصل عليها من الوحدات الايدروكهربائية لتوليد الطاقة تأتى من الشمس بطريقة غير مباشرة ويتم ذلك بالطريقة الاتية . يتبخر الماء من البحيرات والمحيطات الموجودة على سطح الأرض نتيجة لحرارة الشمس ، ثم يسقط بخار الماء مرة ثانية على الأرض فى صورة مطر أو جليد ، وكثيرا مايحدث هذا فى المناطق المرتفعة عن مستوى سطح البحر . وعندما يفقد الماء طاقة الوضع التثاقلية أثناء سقوطه إلى البحار ، يمكننا أن نجعله يبذل شغلا بادارة التربينات والمعدات المشابهة .

هناك مصادر ثانوية اخرى لطاقة الارض . فالمد والجذر مثلا هما نتيجة لتأثيرات الجاذبية التى يؤثر بها القمر على الأرض . والرياح والتيارات المحيطية وفروق درجات الحرارة فى المحيطات وغيرها هى أيضا مصادر ممكنة للطاقة ، ولكن لايعتمد عليها فى الوقت الحالى .

نرى من ذلك اذن أن الأرض تتلقى الطاقة من مصدرين رئيسيين وهما مصادر الطاقة النووية والشمس ، (وفى الواقع فإن الشمس ايضا هى مصدر طاقة نووية ، وسيناقش ذلك بتفصيل اكثر فى الفصل الثامن والعشرين) . ولكن الطاقة المحبوسة الآن فى الوقود الا حفورى (النفط والبنزين والفحم) ، ستصبح اقل قابلية للاستعمال عندما تتغير صورتها الكيميائية الحالية . ونحن نأمل أن يسد النقص فى هذا المصدر جزئيا بزرع مواد الوقود كالنباتات والطحالب ... الخ فى ضوء شمس . اما مصادرنا النووية للطاقة فإنها ضخمة جدا ، ويبدو أننا سنكون قادرين فى آخر الأمر على الإفادة منها على مستوى واسع . ولكن هذه المصادر أيضا سوف تستنفد فى خلال بضع عشرات من آلاف السنين . وحتى الشمس ذاتها سوف تصبح مصدر طاقة ضئيل القيمة فى مدى بضعة بلايين من السنين . وسنناقش هذه الموضوعات وموضوعات أخرى مماثلة فى الفصل الأخير من هذا الكتاب .

٥ - ٩ المكنات

يمكن أن يسمى أى جهاز ميكانيكى تقريبا يساعدنا على بذل الشغل بالمكنة وتقع معظم هذه الأجهزة فى واحد من ثلاثة أصناف عامة . هناك نوع هام جدا من المكنات وهو الذى يمكننا من رفع حمل ثقيل جدا باستعمال قوة صغيرة نسبيا . ومن أمثلة هذا النوع المكنات رافعة السيارة والمطرقة المخلبية والبكرة المركبة . وهذا على سبيل المثال وليس الحصر .



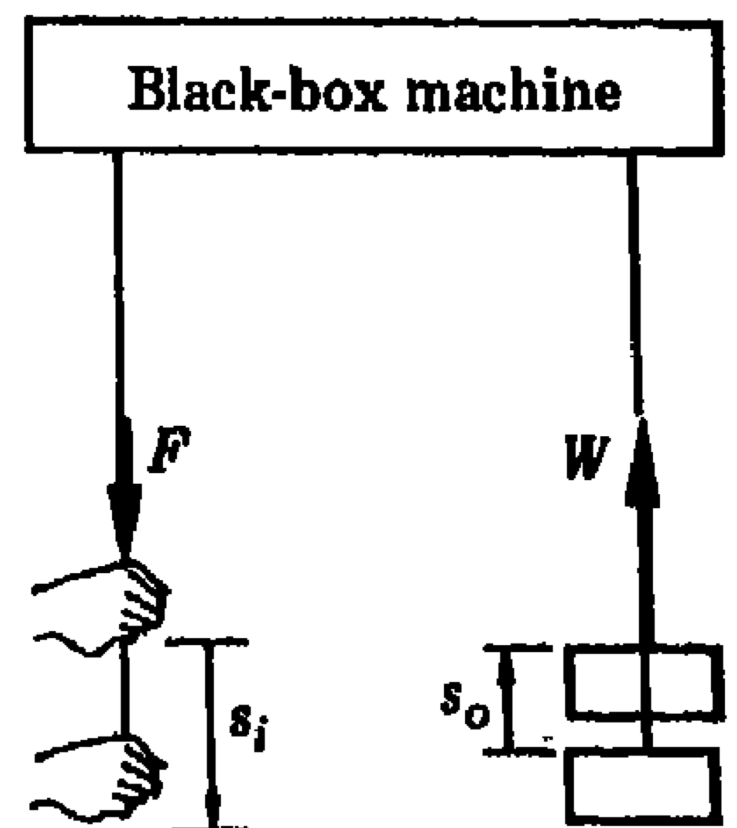
شكل (٥ - ١٦)
يقوم هذا النوع الموضح من المكنات بتغيير اتجاه القوة المسلطة ليس غير . وبذلك تصبح عملية رفع الجسم ملائمة اكثر .

ويستخدم النوع الثانى من المكنات فى تحريك جسم بسرعة كبيرة جدا بالرغم من أن عامل نقل الحركة يكون متحركا بسرعة بطيئة نسبيا . وكمثال لهذا النوع يمكننا أن نذكر مجموعة البكرات أو التروس التى تحول دوران عمود الدخل الى دوران اسرع كثيرا لعمود الخرج .

النوع الثالث من المكنات يساعد على جعل عملية بذل الشغل اكثر ملاءمة ليس غير . ومن أمثلة هذه المكنات البكرة الأحادية المبينة بالشكل ٥ - ١٦ ، فمن الملائم للشخص عادة أن يجذب الحبل الى أسفل عند A لكى يرفع الثقل W الى أعلى عن أن يجذبه مباشرة إلى أعلى. كذلك فإن الجهاز الذى يمكن شخصا ما من تحريك جسم يبعد عنه مسافة معينة هو مثال آخر لمكنة من هذا النوع العام .

أن أيا من هذه المكنات لايستطيع أن يبذل شغلا اكبر من الشغل الذى يبذله العامل الحافز على المكنة . ونحن نعلم أن هذا صحيح بدون فحص المكنة بالتفصيل لأن الطاقة محفوظة فى هذه الاجهزة . فإذا كان الشغل الذى تستطيع المكنة بذله اكبر من الشغل المبذول على المكنة لادارتها لكانت المكنة قادرة على خلق الشغل بداخلها ، وبالطبع فإنها لاتستطيع ذلك . بالإضافة الى هذا فان أية مكنة عملية تحتوى دائما على قدر من الإحتكاك ، لذلك فان جزءا من الطاقة سوف يفقد فى بذل شغل الاحتكاك داخل المكنة . وعليه فإن الشغل اللازم بذله على المكنة لابد أن يكون من الشغل المطلوب بذله بدون المكنة . وأغراض استخدام المكنات هى عادة الأغراض الثلاثة المذكورة سابقا . ولكن يجب أن نتذكر جيدا أن أية مكنة لايمكن أن تبذل شغلا أكبر من الشغل المبذول عليها لإدارتها .

شكل (٥ - ١٧)
يمكننا تعين IMA و AMA لهذه المكنة وكذلك كفايتها بمعلومية F ، W ، s_i ، s_o .



٥ - ١٠ مكنة الصندوق الأسود

هناك مميزات معينة مشتركة لجميع المكنات . ولكى نصف عمل المكنات بوجه عام، من المناسب أن نتخيل أن المكنة موجودة فى صندوق أسود بحيث لاتصرف آلياتها انتباهنا . وهذا الموقف موضح فى شكل ٥ - ١٧ .

فى هذه المكنة يمثل الحبل الأيسر طرف الدخل والحبل الايمن طرف الخرج . عندما يجذب شخص ما الحبل الأيسر بقوة حافزة قدرها F فإن المكنة تدور . عندئذ يبذل طرف الخرج شغلا يرفع الجسم الذى وزنه W الى أعلى .

لوصف خصائص هذه المكنة تماما من الضرورى إجراء نوعين من التجارب فقط عليها . (١) يجب قياس المسافة التى تتحركها نقطة عمل قوة الدخل s_i ، عندما يرفع الثقل مسافة قدرها s_o بواسطة طرف الخرج . وبإسلوب آخر ، يجب قياس الطول s_i من الحبل الأيسر الذى يخرج من المكنة عندما يدخل طولا قدره s_o من الحبل الأيمن داخل الصندوق . (٢) يجب قياس القوة الواجب تسليطها على طرف الدخل لرفع حمل معلوم . تبين أولى هاتين التجربتين الحمل الذى تستطيع المكنة رفعه باستخدام قوة قدرها F وكذلك عما إذا كان بالمكنة احتكاك ام لا . وحيث أن الطاقة التى وضعت فى المكنة Fs_i تستخدم بأكملها بواسطة المكنة فى بذل شغل نافع يرفع إلى أعلى فإن :

فى الحالة المثالية ، بدون احتكاك $Fs_i = Ws_o$

ومن هذه المعادلة ينتج أن :

بدون احتكاك $\frac{W}{F} = \frac{s_i}{s_o}$

الفائدة الميكانيكية المثالية

وحيث أن النسبة بين وزن الحمل المرفوع W والقوة اللازمة لرفعه F هي مقياس لفائدة رفع الثقل للمكنة ، نقول أن **الفائدة الميكانيكية المثالية** (IMA) لها تعطى بقيمة هذه النسبة فى حالة عدم وجود احتكاك ، أى s_i/s_o . وعليه ، بالنسبة لأية مكنة :

$$\text{IMA} = \frac{s_i}{s_o} \qquad (٥ - ٧)$$

وتعنى المعادلة (٥ - ٧) مايلى . إذا فحصت مكنة ما ووجد أن قوة الدخل تتحرك مسافة قدرها 10 ft عندما يرتفع الحمل مسافة قدرها 2 ft فإن :

$$\text{IMA} = \frac{10\text{ ft}}{2\text{ ft}} = 5$$

وهذا يعنى أنه اذا لم يكن بالمكنة أى احتكاك فانها تستطيع رفع جسم وزنه 500 lb باستعمال قوة دخل قدرها 100 lb . لاحظ أن المكنة لاتستطيع أن تبذل شغلا اكبر من الشغل الذى يزودها به العامل الحافز حتى فى هذه الحالة المثالية . وبالرغم من أن قوة الخرج تساوى خمسة اضعاف قوة الدخل فان قوة الخرج تحرك الجسم فقط خمس المسافة التى تتحركها قوة الدخل . أى أن القوة تضاعف بواسطة المكنة ولكن ليس الطاقة .

وبالطبع فإن المكنة الحقيقة ليست عديمة الاحتكاك كلية . لذلك فاننا نحتاج الى تجربة تبين لنا هذه السمة من سمات المكنة،وهى التجربة الثانية المذكورة سابقا والتى نقيس فيها القوة F اللازمة لرفع الوزن W . فى هذه الحالة تسمى بالنسبة W/F **بالفائدة الميكانيكية الفعلية أو الحقيقية** (AMA) للمكنة وعليه ، فإن :

الفائدة الميكانيكية الفعلية

$$AMA = \frac{W}{F} \quad (٥ - ٨)$$

وبالطبع فان AMA لابد أن تكون اصغر من IMA لأن الاحتكاك سيقلل الحمل W الممكن رفعه بنفس القوة المسلطة F .

تعريف تعرف **كفاءة** المكنة أو العملية بالنسبة بين شغل الدخل وشغل الخرج . وحيث أن هاتين الكميتين هما Ws_o و Fs_i على الترتيب ، فإن :

$$\text{الكفاءة} = \frac{Ws_o}{Fs_i} = \frac{W/F}{s_i/s_o}$$

كفاءة المكنة اذن :

$$\text{الكفاءة} = \frac{AMA}{IMA} \quad (٥ - ٩)$$

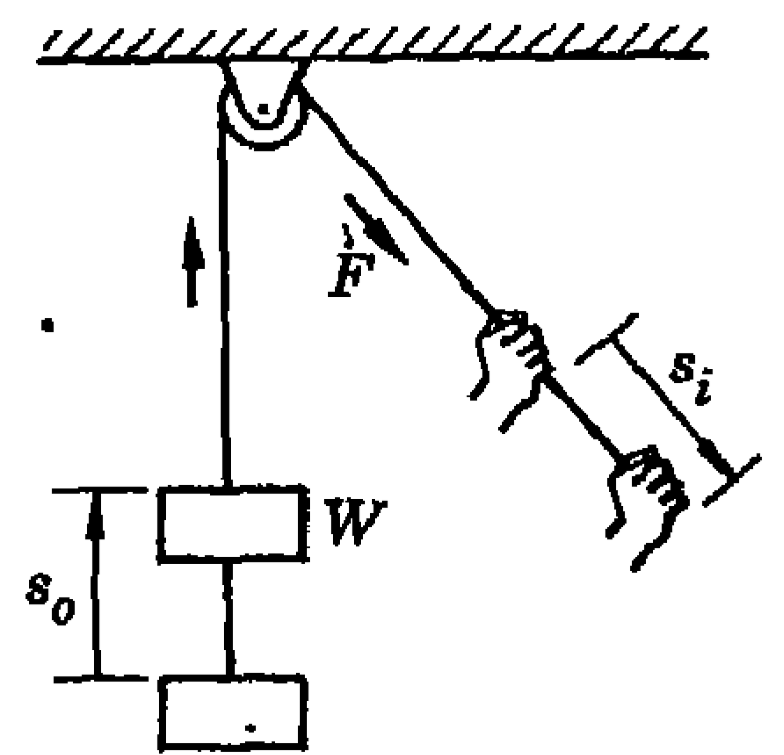
وذلك بناء على المعادلتين (٥ – ٧) و (٥ – ٨)،واذا لم يكن هناك احتكاك فان AMA و IMA سيكونان متماثلين وبالتالى فان الكفاءة ستساوى 1.00 أو ، كما يقال عادة 100 فى المائة . ومن ناحية أخرى ، اذا كان AMA = 4 ، IMA = 5 ، فإن الكفاءة ستكون $4/5$ وهو يساوى 0.80 أو 80 فى المائة .

لاحظ ان الكميات الاساسية للمكنة وهى AMA ، IMA والكفاءة تعرف بنفس الطريقة لجميع المكنات . ولدراسة هذه الكميات فى مواقف معينة يجب علينا الآن فحص الأشغال الداخلية لمكنات مختلفة .

٥ – ١١ البكرة البسيطة

الكرة البسيطة هى المكنة المبية بالشكل ٥ – ١٨ ، وتتكون من حبل يلتف مرة واحدة على عجلة مركبة على محور العجلة . وحيث أنه يفترض أن الحبل لايتمدد ، فإذا جذبت القوة F الحبل مسافة s_i ، فإن الجسم الذى وزنه W سيرتفع مسافة قدرها $s_o = s_i$. يمكننا إذن كتابة المعادلة (٥ – ٧) لهذه المكنة على الصورة :

$$IMA = \frac{s_i}{s_o} = 1.00$$



شكل (٥ – ١٨)
عند استعمال البكرة بالطريقة المبينة تكون IMA لها مساوية للوحدة .

تعتمد الفائدة الميكانيكية الفعلية للمكنة على الاحتكاك فى البكرة . وبالنسبة لبكرة بسيطة مثل هذه البكرة يمكننا جعل الإحتكاك صغيرا للغاية . وعليه فإن قيمة AMA ستكون قريبة جدا من قيمة IMA . وبالرغم من ذلك فإنها لايمكن ابدا أن تساوى 1.00 . لذلك فان كفاءة المكنة ستكون اقل قليلا من 100 فى المائة .

مثال توضيحى ٥ – ١٤ . فى الجهاز المبين بشكل ٥ – ١٨ تلزم قوة قدرها 50 lb لرفع الجسم الذى وزنه 40 lb . ماهى كفاءة المكنة ؟

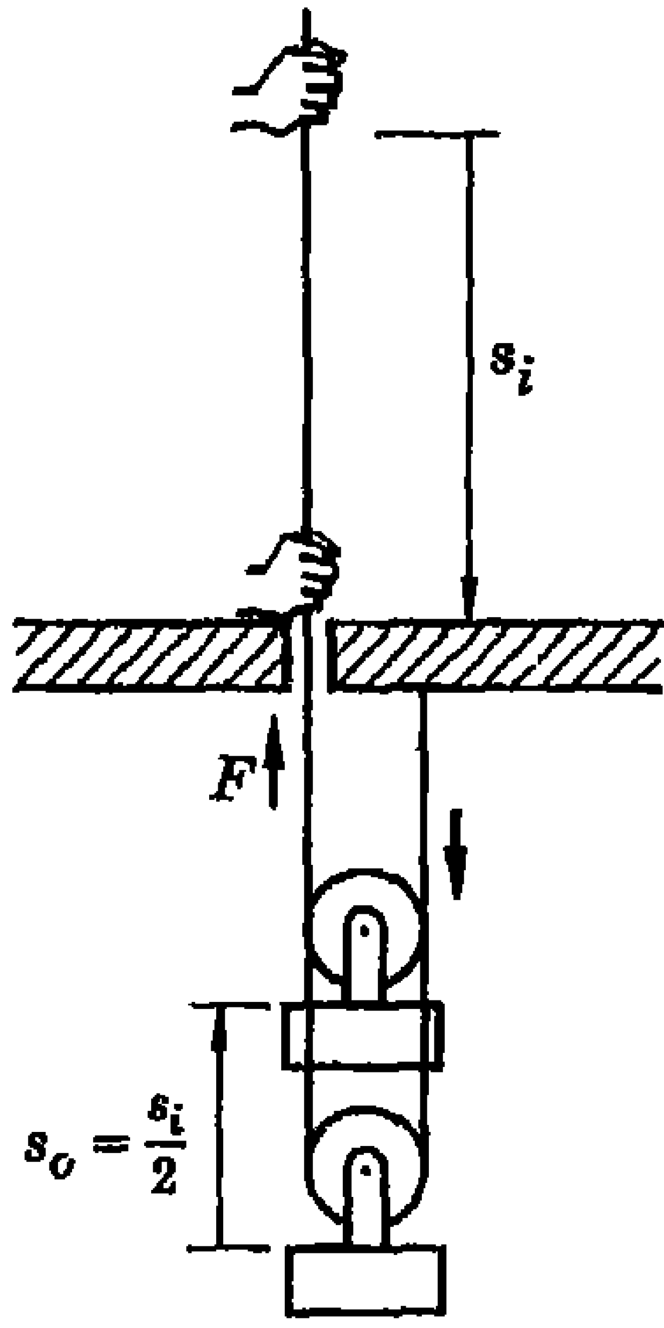
طريقة الحل . من تصميم المكنة يتضح أن $s_i = s_o$ ، وعليه فان IMA = 1.00 . وتبين المعطيات أن AMA = 40 lb/50 lb إذن :

$$\text{Efficiency} = \frac{0.80}{1.00} = 0.80$$

أو :

80%

٥ – ١٢ اجهزة اخرى من البكرات



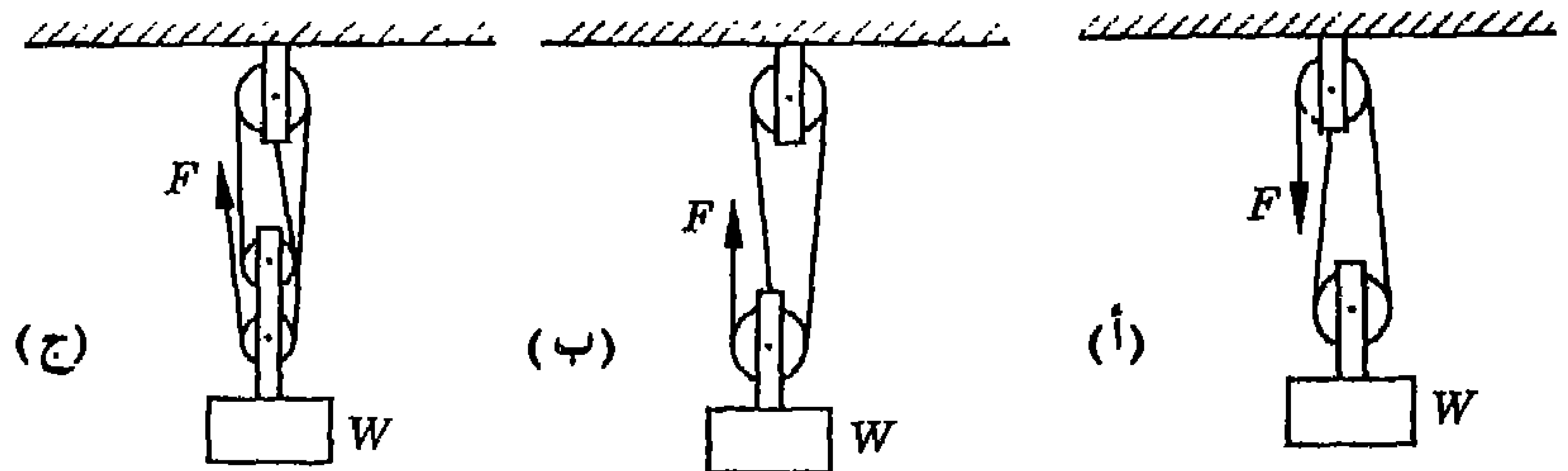
شكل (٥ – ١٩)
IMA لهذا الجهاز من البكرات يساوى 2 ، لأن القوة المسلطة تتحرك مسافة تساوى ضعف المسافة التى يتحركها الحمل .

يمثل الشكل ٥ – ١٩ حالة بكرة واحدة قابلة للتحرك . لاحظ أن القوة F يجب أن تجذب الحبل 2 ft إلى أعلى لكل قدم يتحركه الحمل إلى أعلى . وهذا نتيجة لأنه عندما تتحرك البكرة مسافة 1 ft مقتربة من السقف ، فإن كلا الحبلين الأيمن والأيسر والمتجهين إلى السقف سيقصران بمقدار 1 ft . وهذا يعنى أنه يجب حذب الحبل إلى أعلى خلال الثقب مسافة بمقدار 2 ft لكى يقصر طول الحامل بمقدار 1 ft .

اذن $s_i = 2s_o$ بالنسبة لهذه المجموعة ، وعليه فان :

$$\text{IMA} = \frac{s_i}{s_o} = 2.00$$

من الواضح أنه إذا لم تكن المجموعة متحركة فإن كلا الحبلين سيجذبان البكرة والثقل الى أعلى . وعليه فاذا كانت البكرة عديمة الوزن فإن الشد فى كل حبل سيكون $W/2$ ، بحيث يكون الشد المشترك المؤثر على البكرة مساويا للوزن W . فى هذه الحالة ستكون F مساوية للمقدار $W/2$. وفى الواقع فان F يجب أن تكون بالطبع كبيرة بدرجة كافية لكى يتحمل الحبلان أيضا وزن البكرة ولكى تتغلب على تأثير الاحتكاك كذلك ، وعليه فمن المستحيل أن تكون AMA = 2.00 لهذه المكنة . فاذا كان وزن البكرة يساوى W تقريبا فان كفاءة المكنة ستكون صغيرة جدا حتى اذا كان الاحتكاك فى البكرة نفسها صغيرا جدا . ومع ذلك فإن هذا يعتبر تحسينا بالمقارنة بالحبل الواحد فى كثير من الوجوه .

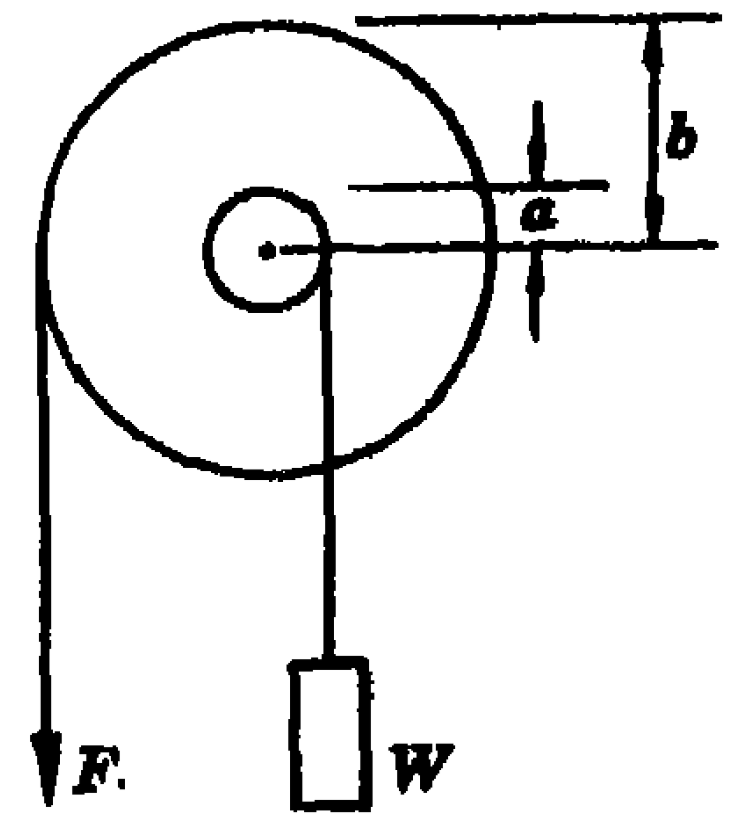


شكل (٥ – ٢٠)
قيم IMA للمجموعات المبينة فى الشكل هى 2 ، 3 ، 4 على الترتيب . لاحظ أيضا أن هذه القيم هى عدد الحبال التى تجذب البكرة حاملة الثقل الى أعلى .

يمثل الشكل ٥ – ٢٠ مجموعات أكثر تعقيدا من البكرات . باستخدام نفس أسلوب التفكير الذى اتبع فى الحالة السابقة يمكننا أن نثبت أن IMA للأجهزة (أ) ، (ب) ، (جـ) تساوى 2 ، 3 ، 4 على الترتيب . لاحظ فى هذه الحالة ، وكذلك فى الحالة الموضحة فى شكل ٥ – ١٩ ، أن IMA تساوى عدديا عدد الحبال التى تجذب البكرة الحرة الى أعلى . وهذه الحقيقة تمدنا بقاعدة بسيطة لتعيين IMA لمثل هذه البكرات .

٥ – ١٣ العجلة ومحور العجلة

يتكون الجهاز المبين بالشكل ٥ – ٢١ من حبل دخل ملفوف حول عجلة كبيرة نصف قطرها b ومحور العجلة الملفوف عليه حبل يحمل الثقل المطلوب رفعه الى أعلى . لنفرض أن نصف قطر محور العجلة a أصغر كثيرا من b..



شكل (٥ – ٢١)
تعطى قيمة IMA للعجلة ومحورها بالنسبة بين نصف قطر العجلة ونصف قطر محور العجلة .

لايجاد IMA لهذه المكنة البسيطة ، تأمل مايحدث عند دوران العجلة ومحورها دورة واحدة فى عكس اتجاه عقارب الساعة . عندئذ سيفك حبل الدخل طولا يساوى محيط العجلة . اذن :

$$s_i = 2\pi b$$

أما الحبل الذى يحمل الثقل فانه سيلتف لفة واحدة حول محور العجلة رافعا الثقل مسافة تساوى تماما طول محيط محور العجلة . اذن :

$$s_o = 2\pi a$$

وعليه فإن :

$$\text{IMA} = \frac{s_i}{s_o} = \frac{b}{a}$$

.هذه المكنة نافعة للغاية لأن الإحتكاك الملازم لها صغيرا وعلاوة على ذلك يمكننا أن نجعل b أكبر كثيرا من a . ومن المألوف أن يكون $a = \frac{1}{2}$ in ، $b = 12$ in . عندئذ ستكون قيمة IMA لهذه المجموعة هى 24 ، وهى قيمة كبيرة جدا للفائدة الميكانيكية لمثل هذا الجهاز البسيط .

ملخص

يعطى الشغل المبذول بواسطة القوة F على جسم ما عندما يتحرك هذا الجسم إزاحة قدرها S فى خط مستقيم بالعلاقة Work $= Fs\cos\theta$ ، .حيث θ هى الزاوية بين F و S . وبدلالة مركبة F فى اتجاه S يعطى هذا الشغل بالعلاقة $W = F_s s$. وحدات الشغل هى الجول والارج والقدم – باوند . العلاقة بين هذه الوحدات هى $1\text{ J} = 10^7\text{ erg} = 0.738\text{ ft. lb}$.

تقيس القدرة معدل بذل الشغل ، وتعرف بالشغل المبذول فى وحدة الزمن . الوحدات النموذجية للقدرة هى الواط (وهو الجول فى الثانية) والقدم – باوند فى الثانية والقدرة الحصانية . العلاقة بين هذه الوحدات هى كالتالى : 746 W = 1 hp ، 1.36 W = 1 ft. lb/s .

واذا كان للجسم طاقة،فإنه يكون قادرا على بذل الشغل . طاقة الحركة (KE) هى القدرة على بذل الشغل بسبب حركةالجسم اذا كانت m هى كتلة الجسم و v سرعته فان $KE = \frac{1}{2}mv^2$. يمكن للجسم أن يفقد هذا الشغل الكبير ضد القوى الخارجية عندما يصل الى حالة السكون . وحدات KE هى نفس وحدات الشغل . إذا تعرض الجسم لقوة محصلة تبذل شغلا عليه فان الشغل المبذول على الجسم يساوى التغير فى طاقة حركته .

يقال أن للجسم طاقة وضع تثاقلية (PE) إذا كان هذا الجسم قادرا على بذل الشغل بسبب قوة الجاذبية المؤثرة عليه إلى أسفل . طاقة وضع الجسم هى mgh . يمكن للجسم أن يبذل هذا الشغل الكبير عندما يهبط مسافة قدرها h . المستوى المرجعى المستخدم لقياس ارتفاع الجسم اختيارى .

اذا كان الشغل المبذول لتحريك الجسم من النقطة A الى النقطة B ضد قوة ما لايعتمد على مسار الحركة يقال أن هذه القوة احتفاظية . قوة الجذب احتفاظية . ونتيجة لذلك فإن الشغل المبذول ضد الجاذبية لرفع الجسم من A الى B هو mgh ولايعتمد على المسار المتبع . قوى الاحتكاك ليست احتفاظية .

يمكن صياغة نظرية الشغل والحركة لأى جسم كالتالى :

$$\text{Loss in KE} + \text{loss in PE} = \text{work}_{dec} - \text{work}_{inc}$$

ينص قانون بقاء الطاقة على أن الطاقة لاتستحدث ولاتفنى.عندما يحدث نقص فى إحدى صور الطاقة فإن زيادة مساوية لابد أن تحدث فى صور الطاقة الأخرى . ينتج الشغل المبذول ضد قوى الإحتكاك طاقة حرارية تساوى مقدارا شغل الإحتكاك المبذول . هناك صور كثيرة للطاقة . الطاقة الكيميائية والكهربائية والنووية صور نموذجية للطاقة .

المكنات هى أجهزة تساعدنا على بذل الطاقة . لاتبذل المكنات ابدا شغلا اكبر من الشغل المعطى إليها . تستخدم الفائدتان الميكانيكيتان المثالية والفعلية لوصف المكنة البسيطة . إذا كانت قوة الدخل F تتحرك مسافة قدرها s_i عندما تتحرك قوة الخرج W مسافة قدرها s_o ، فإن $IMA = s_i/s_o$ بينما $AMA = W/F$. AMA اصغر دائما من IMA . تعرف كفاءة المكنة بالعلاقة الكفاءة = (شغل الخرج) / (شغل الدخل) . وهذه الكمية تكافىء eff = AMA/IMA .

الحد الادنى من الاهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – تعريف الشغل ووحداته . اعطاء أمثلة مختلفة لقوة لاتبذل شغلا لأن (أ) $s = 0$ أو (ب) $F_s = 0$ ،اعطاء امثلة لقوة تبذل شغلا سالبا .

٢ – حساب الشغل المبذول على جسم ما بواسطة قوة معينة ثابتة عندما يتحرك الجسم مسافة معينة فى خط مستقيم .

٣ – تعريف القدرة ووحداتها . حساب القدرة من معطيات المعدل الذى يبذل به الشغل .

٤ – تحويل وحدات الواط والقدم – باوند فى الثانية والقدرة الحصانية كل منها إلى الأخرى .

٥ – تعريف KE وحساب قيمتها بمعلومية m ، v .

٦ – حساب التغير فى KE لجسم يقع تحت تأثير قوة محصلة تؤثر فى اتجاه مسافة معلومة .

٧ – تعريف طاقة الوضع التثاقلية . حساب قيمتها لجسم بمعلومية البيانات اللازمة .

٨ – شرح ماذا يعنى بالقوة الإحتفاظية . توضيح حقيقة أن قوة الجذب إحتفاظية .

٩ – اعطاء بعض الأمثلة لمواقف تتحول فيها KE إلى PE وبالعكس.

١٠ – صياغة نظرية الشغل والطاقة بالكلمات وفى صورة معادلة . تطبيق هذه النظرية على أمثلة مشابهة لتلك الامثلة المعطاه فى الجزء ٥ – ٦ .

١١ – صياغة قانون بقاء الطاقة باسلوبك الخاص . شرح لماذا لايتعارض فقد KE فى بذل شغل الاحتكاك مع هذا القانون .

١٢ – حساب IMA و AMA والكفاءة لمكنة الصندوق الاسود بمعلومية المعطيات الكافية .

١٣ – اعطاء قيمة AMA لمكنة بسيطة مثل جهاز البكرات بشرط معرفة تركيب المكنة .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الشغل $= F_s s = Fs\cos\theta$

الجول والارج والقدم – باوند

القدرة = الشغل / الزمن

الواط والقدرة الحصانية

الكيلو واط ساعة

$KE = \frac{1}{2}mv^2$

طاقة الوضع التثاقلية $= mgh$

القوى الاحتفاظية

نظرية الشغل والطاقة

قانون بقاء الطاقة

$IMA = s_i/s_o$

$AMA = W/F$

الكفاءة = (شغل الخرج) / (شغل الدخل)

أو : Efficiency = AMA / IMA

اسئلة وتخمينات

١ – يدور القمر وكثير من الاقمار الصناعية حول الأرض فى مدارات دائرية تقريبا مركزها هو مركز الأرض . ماهو الشغل الذى تبذله قوة الجاذبية الأرضية عليها ؟

٢ – وضح بناءعلى وجهة نظر طاقة الحركة لماذا يحتمل أن تكون الشاحنة المحملة اكثر تدميرا من فولكس واجن عن الاصطدام بجسم كبير ساكن ؟ افترض أن السرعتين الابتدائيتين متساويتان .

٣ – كرة معلقة فى نهاية خيط وتتأرجح المجموعة كبندول بسيط . صف مايحدث لطاقة الحركة عندما يتأرجح البندول ذهابا وايابا . كرر العمل بالنسبة لطاقة الوضع . ماهى العلاقة بينهما ؟ ماذا يحدث للمجموعة عندما يفقد البندول طاقته ؟ هل يبذل جذب الخيط للكرة شغلا ؟

٤ – يحمل شخص حقيبة بها مشتريات من محل بقالة ويقف ساكنا يتحدث مع صديق . وتقف سيارة ساكنة وموتورها دائر . كيف يتشابه هذان الموقفان من وجهة الشغل والطاقة ؟

٥ – يسافر عامل متجول حى الضمير فى شاحنة صندوقية من شيكاغو الى بريورى ، وطوال الطريق ، كان هذا العامل يدفع الحائط الامامى للسيارة . ونظرا لأنه كان فى يوم ما طالب فيزياء ، كان هذا العامل يظن أنه يبذل شغلا كبيرا لأن كلا من F_s و s كانتا كبيرتين . أين الخطأ فى هذا التفكير ؟

٦ – حيث أن الأرض تتحرك بالنسبة الى الشمس فانه لأى شيء عليها طاقة حركة ، على الأقل فى رأى مشاهد يظن أن الشمس ساكنة لماذا لم نكن فى حاجة إلى أن نأخذ هذا فى الاعتبار عند حل الامثلة فى هذا الفصل ؟

٧ -- هل KE كمية موجهة أم كمية قياسية ؟

٨ – كرة كتلتها m موجودة على ارتفاع h_1 فوق سطح المنضدة وكان سطح المنضدة مرتفعا مسافة قدرها h_2 من الأرض . يقول شخص أن طاقة وضع الكرة هى mgh_1 ولكن الآخر يقول أن طاقة وضعها $mg(h_1 + h_2)$.أيهما صحيح ؟

٩ – عندما يدخل صاروخ الغلاف الجوى عند عودته من الفضاء فإن مخروط المقدمة يصبح ساخنا جدا . من أين تأتى هذه الطاقة الحرارية ؟

١٠ – عندما تسقط قطعة طباشير من على المنضدة فإن سرعتها قبل الإصطدام بالأرضية مباشرة يمكن ايجادها بمساواة طاقة الوضع الابتدائية بالطاقة الكلية قبل أن تصطدم بالأرضية مباشرة.اثبت أن نفس النتيجة سوف يحصل عليها اذا كان المستوى الصفرى لطاقة الوضع هو (أ) الأرضية ، (ب) سطح المنضدة ، (جـ) السقف .

١١ – تحتوى السيارات والجرارات .. الخ على مجموعات تروس يمكن تغييرها بالنقل . ناقش لماذا تستخدم عملية النقل باعتبار أن مجموعات التروس مكنات مثالية .

١٢ – يقترح أن المد والجذر المتدفقان داخلا وخارجا فى الموانىء يمكن استخدامهما كمصادر للطاقة . وهناك اقتراح آخر بإمكانية استخدام موجات المحيطات لهذا الغرض . ناقش الآراء المؤيدة والمعارضة لكل من الإقتراحين من وجهة النظر العملية . من أين تأتى الطاقة فى كل حالة ؟

١٣ – ماهى القدرة الحصانية بالتقريب التى يمكن للإنسان بذلها فى فترة قصيرة ، عند صعوده السلالم بسرعة كبيرة مثلا ؟ (ق)

١٤ – قدر كمية الشغل النافع (كما تعرف فى الفيزياء) التى يمكن للانسان المتوسط بذلها فى يوم واحد . وللمقارنة ، يمكن للوجبة النموذجية أن تزود الشخص بكمية قدرها 2000 kcal ($\approx 8.4 \times 10^6$ J) من الطاقة لكل يوم-أين تذهب الكمية الباقية من الطاقة ؟ (ق)

١٥ – قدر القوة التى يتعرض لها سائق عندما تصطدم سيارته بأخرى تصادما مباشرا . إفترض أن السيارتين متماثلتين وأنهما تسيران بسرعة قدرها 60 mi/h . ناقش تأثير أحزمة التثبيت ووضع السائق والعوامل المشابهة الاخرى . (ق)

مسائل :

يمكن حل كثير من المسائل فى هذه المجموعة بسهولة كبيرة باستخدام طرق الطاقة .

١ – يراد استخدام خيط افقى لجذب جسم كتلته 30 kg على الأرضية بسرعة ثابتة . فاذا كان معامل احتكاك الانزلاق بين الارضية والجسم هو 0.60،فما قيمة الشغل المبذول بواسطة الخيط لجذب الجسم مسافة قدرها 5.0 m ؟

٢ – لجذب طفل معين فى عربة تلزم قوة قدرها 30 lb مائلة بزاوية قدرها 20° فوق الممشى الجانبى الأفقي . ماهو الشغل المبذول فى جذب العربة مسافة قدرها 50 ft ؟

٣ – تجذب عربة صغيرة مملوءة بالفحم كتلتها 6000 lb الى أعلى على مستوى مائل فى داخل منجم فحم . وكان حبل الجذب موازيا للمستوى المائل ويؤثر بقوة قدرها 200 lb على العربة . ماهو الشغل المبذول على العربة بواسطة الحبل عندما تتحرك العربة مسافة قدرها 100 ft ؟

٤ – يتسلق رياضى كتلته 80 kg تلا ارتفاعه 100 m . ماهو الشغل الذى يبذله المتسلق ضد الجاذبية ؟ هل تعتمد كمية الشغل هذه على المسار الذى يتبعه المتسلق ؟ واذا كان زمن التسلق 90 min فما متوسط القدرةالحصانية المستهلكة بواسطة المتسلق بهذه الطريقة ؟

٥ – تستغرق شاحنة كتلتها 30,000 kg زمنا قدره 40 min لتصعد فى طريق جبلى من ارتفاع 1800 m الى ارتفاع 2900 m . (أ) ماهو الشغل الذى تبذله الشاحنة ضد الجاذبية ؟ (ب) ماهو متوسط القدرة الحصانية التى تستهلكها الشاحنة ضد الجاذبية فى هذه العملية ؟

٦ – اسقط جسم كتلته 2 kg من ارتفاع قدره 12 m وكانت سرعته قبل الإصطدام بالأرض مباشرة هى 7 m/s . ماهو متوسط قوة الإحتكاك التى تعاكس حركتها ؟

٧ – ماهى القوة الثابتة اللازمة لتسارع سيارة وزنها 3200 lb من السكون الى سرعة قدرها 60 ft/s فى مسافة قدرها 80 ft ؟

٨ – كانت سيارة كتلتها 2000 kg تتحرك بسرعة قدرها 20 m/s عندما اصطدمت بحائط اسمنتى فتوقفت فى خلال مسافة قدرها 3 m . ماهو متوسط القوة المعوقة ؟

٩ – يراد ان يرفع موتور مصعدا وزنه 2000 lb من السكون بحيث تصل سرعته الى 8 ft/s على ارتفاع قدره 40 ft . (أ) ماهو الشغل الذى يجب أن يبذله الموتور ؟ (ب) ماهو كسر الشغل الكلى الذى تحول الى طاقة حركة ؟

١٠ – تجذب قاطرة سلسلة من الشاحنات الصندوقية إلى أعلى على مستوى مائل بزاوية قدرها 5° بادئة من السكون ، وبعد أن تحرك القطار مسافة قدرها 6000 ft كانت سرعته 30 ft/s . إفترض ان الوزن الكلى للقطار 1.50×10^6 lb ماهو الشغل الذى يجب أن تبذله القاطرة ؟ ماهو كسر هذا الشغل الذى يبذل ضد الجاذبية ؟ وبفرض أن التسارع منتظم ، ماهو الزمن الذى تأخذه هذه العملية ؟ ماهى القدرة الحصانية التى تستهلكها القاطرة ؟

١١ – يراد استخدام موتور لتشغيل مضخة معمل صغيرة ترفع 500 cm^3 من الماء مسافة قدرها 2 m فى كل دقيقة : أوجد الحد الادنى لواطية الموتور الذى يستطيع ذلك (كتلة 1 cm^3 من الماء قريبة جدا من 1 g) . **تلميح** : ماهو الشغل الذى يجب أن يبذله الموتور فى كل ثانية ؟

١٢ – لنفرض أن 10^{16} الكترونا تصطدم بستار أنبوبة التليفزيون فى كل ثانية . واذا كان الالكترون يتسارع بين فرق جهد كاف لكى تصل سرعته الى 10^9 cm/s بادئا من السكون ، فماهى القدرة بالواط التى تستهلك للإحتفاظ بهذه الحزمة من الإلكترونات ؟ $(m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg.)

١٣ – تستطيع مكنة تحطيم ذرية تعرف بمولد فان د جراف (سيناقش فى الفصول التالية) أن تعجل حزمة من البروتونات $(m_{proton} = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) من السكون الى سرعة قدرها 10^{19} cm/s-10. فإذا كانت المكنة تعجل 10^{16} بروتونا فى الثانية، فماهى القدرة التى تنتجها بالواط . (البروتون هو ذرة ايدروجين قد فقدت الكترونها) .

١٤ – حررت فرامل سيارة وزنها 3200 lb من غير قصد عندما كانت السيارة واقفة على تل . بأى سرعة تتحرك السيارة عندما تصل الى نقطة تقع على بعد قده 30 ft أسفل نقطة البداية؛ بفرض أن متوسط قوة الإحتكاك التى تعوق الحركة هى 200 lb . إفترض أن المسافة التى قطعتها السيارة هى 90 ft.

١٥ – أوقف موتور سيارة كتلتها 2000 kg عندما كانت تتحرك صاعدة على تل بسرعة قدرها 20 m/s . (أ) إذا كانت السيارة تبعد عن قمة التل بمسافة رأسية قدرها 8 m فى هذه اللحظة ، هل تستطيع السيارة أن تصل إلى القمة ؟ على أى مسافة رأسية من قمة التل يمكن أن توجد السيارة بحيث تستطيع أن تصل إلى القمة ؟ اهمل الإحتكاك .

١٦ – تسير رصاصة كتلتها 1.8 g بسرعة قدرها 360 m/s ثم تصطدم بكتلة من الخشب لتصل الى السكون على عمق قدره 6 cm . (أ) ماهى قيمة متوسط قوة التقاصر ؟ (ب) ماهو الزمن الذى تستغرقه الرصاصة لكى تصل الى حالةالسكون ؟

١٧ – تنزلق خرزة على سلك كما هو مبين فى شكل م ٥ – ١ . ماهى سرعة الخرزة عند B و C و D اذا بدأت الخرزة الحركة من السكون عند A وكانت قوى الإحتكاك مهملة ؟

١٨ – فى الشكل م ٥ – ١ المسافة بين A و D على السلك تساوى 400 cm،فاذا بدأت الخرزة من السكون عند A ثم توقفت نهائيا عن الحركة عند الوصول الى D مباشرة ، فما هو متوسط قوة الاحتكاك الذى تعوق حركتها ؟

١٩* – جذب جسم وزنه W بسرعة قدرها v الى أعلى على مستوى لااحتكاكى مائل زاوية ميله θ . إثبت أن الشغل المبذول على الجسم فى الزمن t يعطى بالعلاقة :

$$\text{Work} = Wvt \sin\theta$$

٢٠* – تقف سيارة كتلتها m، على تل ارتفاعه h وطوله L ،إثبت أن سرعة السيارة عندما تصل الى قاع التل هى :

$$v = \sqrt{2gh - \frac{2LF}{m}}$$

حيث f متوسط قوة الاحتكاك التى تعوق الحركة .

٢١ – علقت كتلة قدرها M كثقل لبندول فى نهاية خيط طوله 4.0 m . جذب الخيط جانبا بواسطة قوة مؤثرة على الكتلة ، حتى صنع الخيط زاوية قدرها 70° مع الرأسى ثم تركت المجموعة حرة . بأى سرعة تتحرك الكتلة عندما تمر تحت نقطة التعليق مباشرة ؟ (إهمل احتكاك الهواء) .

٢٢** – اذا قطعت الكرة الموصوفة فى المسألة ٢١ الخيط عندما مرت تحت نقطة التعليق مباشرة ، أين ستصطدم بالأرضية التى تقع على بعد قدره 2.45 cm تحتها ؟ إعط اجابتك بدلالة المسافة بين نقطة التصادم والنقطة التى تقع على الأرض ، تحت نقطة التعليق مباشرة .

٢٣* – بأى سرعة تتحرك كرة البندول الموصوف فى المسألة ٢١ عندما يصنع الخيط زاوية قدرها 20° مع الرأسى ؟

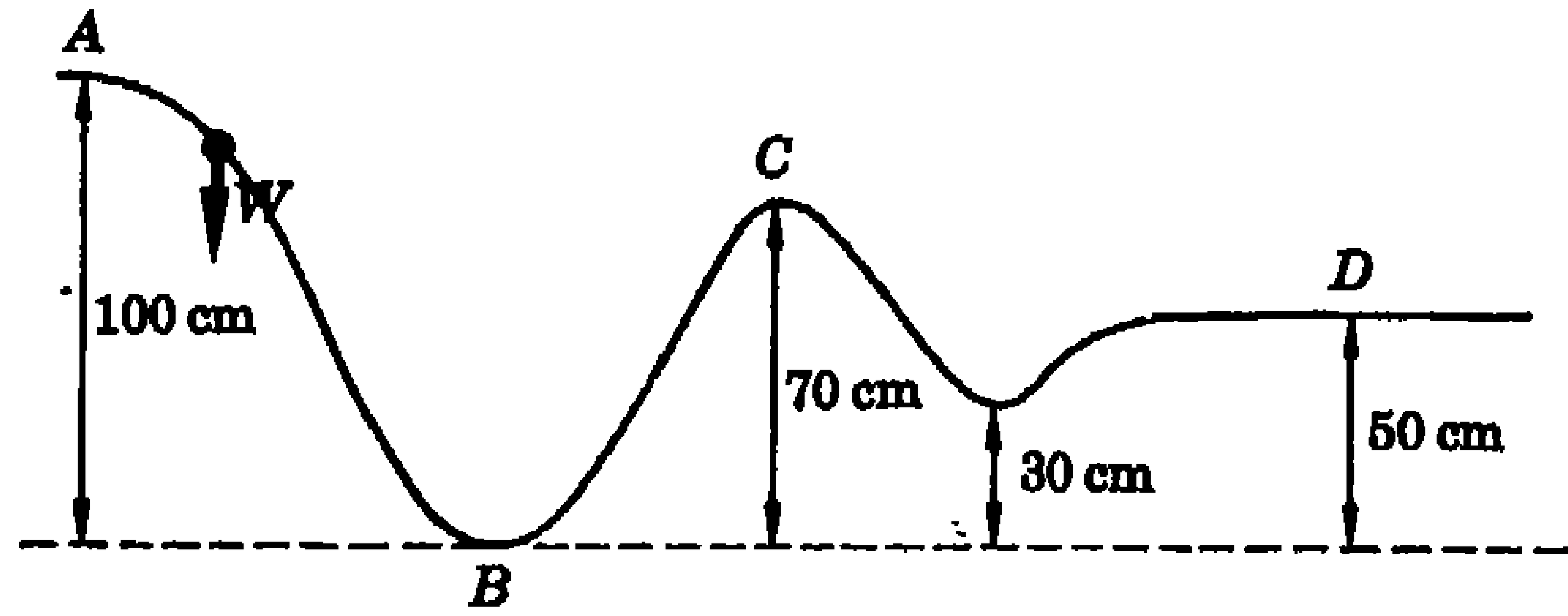
٢٤** – يجرى رجل التجربة الآتية . وجد هذا الرجل أن سيارته وكتلتها 3200 lb تتسارع على أرض مستوية من السكون إلى 40 ft/s فى زمن قدره 10 s،وعندما أوقف المحرك وجد الرجل أن السيارة تصل من السرعة 40 ft/s إلى السكون فى مسافة قدرها 1600 ft.إحسب متوسط القدرة الحصانية التى تنتجها السيارة . (لاحظ أن شغل الاحتكاك المبذول فى إيقاف السيارة لايساوى شغل الاحتكاك فى البداية . لماذا ؟ إفترض بدلا من ذلك أن متوسط قوة الاحتكاك واحد فى الحالتين) .

٢٥ – يرفع جسم وزنه 600 lb بواسطة جهاز بكرات باستخدام قوة قدرها 40 lb ، ووجد أن المكنة المناسب لهذا الغرض ترفع الحمل مسافة قدرها $^1/_2$ ft عندما تتحرك القوة المسلطة مسافة قدرها 10 ft . اوجد (أ) IMA (ب) AMA ، (جـ) كفاءة المكنة .

٢٦ – صمم أبسط جهاز بكرات تقدر كفاءته بالكمية 75% يمكنه أن يرفع 200 N باستخدام قوة قدرها 40 N .

٢٧ – سلطت قوة قدرها 60 N على جهاز العجلة ومحور العجلة لرفع حمل وزنه 500 N . إذا كان نصف قطر العجلة 1.0 ft ونصف قطر محور العجلة 1.0 in ، إوجد (أ) AMA ، (ب) IMA ، (جـ) كفاءة الجهاز اذا كان نصف قطر الحبل الملفوف على محور العجلة هو 0.40 in .

٢٨ – فى نوع معين من روافع السيارات يحرك العامل يده ، أى قوة الدخل مسافة قدرها 2.0 ft لكل $\frac{1}{2}$ in يرتفعها الحمل . (أ) ماقيمة IMA لهذه الرافعة ؟ (ب) ماهى قيمة القوة اللازمة لرفع 2000 lb بفرض أن كفاءة الرافعة 20% ؟



شكل (م ٥ – ١)

٢٩ – موتور ملصوق عليه بطاقة مكتوب عليها « موتور قدرته 0.55 kw »،ماهى القدرة الحصانية التى ينتجها هذا الموتور بفرض ان كفاءته 80% فقط .

٣٠* – ثبت بكرة قطرها 8.0 cm على عمود موتور قدرته $\frac{1}{4}$ hp . فما هو الحمل الذى يستطيع سير يجرى على البكرة ان يجذبه اذا كان العمود يدور بمعدل 1800 rev/min (أى دورة فى الدقيقة) ؟ افترض أن كفاءة الموتور 80% وأن قدرة دخل الموتور هى $\frac{1}{4}$ hp .

٣١* – يدور عمود موتور قدرته 50 w بمعدل قدره 1800 rev/min، وباستخدام تروس تخفيض السرعة يدور العمود النهائى ، أى عمود الخرج ، بمعدل قدره 18 rev/min . (أ) اذا كانت كفاءة المكنة 30% ، فبأى قوة يمكنها أن تجذب سيرا على بكرة نصف قطرها 3.0 cm مثبته فى عمود الخرج ؟ (ب) اذا عكست مجموعة التروس فى الموتور بحيث يدور عمود الخرج بمعدل 180,000 rev/min، فما هى القوة المتاحة لجذب السير على نفس البكرة ؟ افترض ان قدرة الدخل للموتور هى 50 w .

الفصل السادس

كمية التحرك وضغط الغازات

قانون بقاء الطاقة الذى عالجناه فى الفصل السابق ليس قانون البقاء الوحيد المعروف فى الفيزياء . ويعتبر قانون بقاء كمية التحرك الذى سنقدمه فى هذا الفصل المثال الثانى لهذه القوانين . وتترتب على هذا القانون نتائج بعيدة المدى ، وسوف نستخدمه فى اشتقاق علاقة لضغط الغاز المثالى . وستكون علاقة ضغط الغاز وقانون بقاء كمية التحرك فى غاية الأهمية لنا فى الفصول التالية .

٦ - ١ مفهوم كمية التحرك

من الخبرات العامة المعروفة لنا جميعا أن للجسم المتحرك كمية تحرك تجعل الجسم يؤثر بقوة معينة على أى شخص يحاول ايقافه . وكلما كان الجسم يتحرك بسرعة أكبر كلما كان من الصعب ايقافه . بالإضافة إلى ذلك ، كلما كانت كتلة الجسم أكبر كلما كانت صعوبة إيقافه أكبر . فمثلا ، من الصعب إيقاف سيارة تتحرك بمعدل قدره 2 m/s عن إيقاف لعبة على هيئة سيارة صغيرة تسير بنفس السرعة .

وقد سمى نيوتن هذه الصفة للجسم المتحرك بحركة الجسم . وفى الوقت الحاضر تعرف هذه الكمية باسم **كمية تحرك** الجسم وتعرف بالعلاقة : **تعريف**

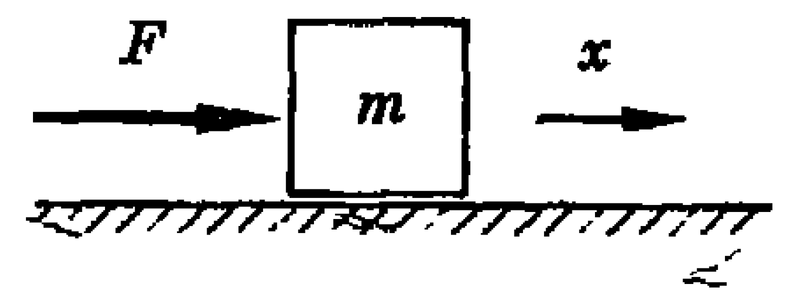
كمية التحرك

$$\text{Momentum} = m\mathbf{v} = \mathbf{p} \qquad (٦ - ١)$$

فى هذه العلاقة $\mathbf{v}$ هى السرعة للكتلة m . كمية التحرك إذن هى كمية موجهة أو متجهة فى نفس اتجاه الحركة ، أى فى اتجاه السرعة . من المعتاد استعمال الرمز $\mathbf{p}$ لتمثيل كمية التحرك .

من الواضح أن كمية تحرك الجسم هى نتيجة للقوى التى تسبب تسارع الجسم من السكون إلى السرعة v . بالمثل ، فاذا اريد إبطاء الجسم ، أى جعله يفقد كمية التحرك ، فمن الضرورى أن نسلط عليه قوة معوقة . كذلك فإن القوة المعوقة الكبيرة تسبب فقدانا أكبر لكمية تحرك الجسم فى فترة زمنية معينة من الذى تسببه قوة معوقة صغيرة فى نفس الزمن . يراد الآن إيجاد العلاقة الرياضية المضبوطة بين القوة والتغير فى كمية التحرك .

٦ - ٢ قانون نيوتن الثانى مصاغا مرة أخرى



شكل ٦ - ١
القوة الكلية المطبقة F تزيد كمية تحرك الكتلة . كمية التحرك لها اتجاه ، والزيادة ستكون فى اتجاه F .

اعتبر تسارع جسم بواسطة قوة ثابتة كما هو مبين بالشكل ٦ - ١ . القوة المذكورة هى صافى القوة غير المتزنة المؤثرة على الجسم والتى تسبب تسارعا منتظما لهذا الجسم فى الاتجاه x . يمكن كتابة قانون نيوتن الثانى كمايلى :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}$$

وإذا كانت السرعة الإبتدائية للجسم هى $\mathbf{v}_0$ وكانت القوة تؤثر عليه لزمن قدره t فإن معادلات الحركة سوف تعطى النتيجة الآتية :

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t$$

وباستبدال $\mathbf{a}$ بالكمية $\mathbf{F}/m$ وإعادة ترتيب حدود المعادلة سنحصل على :

$$\mathbf{F}t = m\mathbf{v} - m\mathbf{v}_0 \qquad (٦ - ٢)$$

نرى من هذه المعادلة أن التغير فى كمية حركة الجسم $m\mathbf{v} - m\mathbf{v}_0$ يساوى حاصل ضرب القوة المؤثرة فى زمن تأثيرها . وهذا بالفعل أقرب الى الطريقة التى كتب بها

نيوتن قانونه الثانى من الصورة $F = ma$ التى أعطيناها سابقا . والصورة الأولى أكثر عمومية من الصورة $F = ma$ لأن من السهل تعميمها بحيث تأخذ فى الإعتبار التغيرات فى كتلة الجسم أثناء تسارعه . فمثلا ، عندما يتسارع الصاروخ فإنه يفقد من كتلته نظرا لاستنفاذ الوقود واندفاعه الى الخارج لإمداد الصاروخ بالدفع اللازم لحركته . وسوف نرى كذلك فى الفصل الثامن والعشرين أن كتلة الجسم تزداد عند السرعات العالية . وعند تغير الكتلة مع السرعة فإن المعادلة (٦ - ٢) يمكن أن تكتب على الصورة :

$$\mathbf{F}t = m\mathbf{v} - m_0\mathbf{v}_0 = \Delta\mathbf{p} \qquad (٦ - ٣)$$

حيث $\Delta\mathbf{p}$ هو التغير فى كمية التحرك ، لاحظ أن اتجاه التغير فى كمية التحرك هو نفس اتجاه القوة . وحدات كمية التحرك هى حاصل ضرب وحدة القوة فى وحدة الزمن ، ، أو وحدة الكتلة فى وحدة السرعة ، وهو نفس الشيء . ومن أمثلة هذه الوحدات النيوتن - ثانية أو الكيلوجرام - متر فى الثانية .

فى كثير من الأحيان يكون من الضرورى تطبيق مفهوم كمية التحرك السابق ذكره على الحالات التى تكون فيها القوة المؤثرة متغيرة . فمثلا ، عندما يدفع المضرب كرة البيسبول فإن القوة المؤثرة تتغير بالتأكيد من لحظة الى أخرى اثناء التصادم . وفى مثل هذه الحالات لانهتم عادة بأى شيء إلا متوسط القوة . بناء على ذلك يعرف متوسط القوة المذكورة فى المعادلتين (٦ - ٢) أو (٦ - ٣) بأنها تلك القوة المنتظمة اللازمة لإحداث التغير المشاهد فى كمية التحرك . وعموما فإن القوة الناتجة من تطبيق المعادلة (٦ - ٢) أو (٦ - ٣) فى عمليات التصادم ستكون متوسط القوة المعروفة حسب المفهوم السابق ذكره .

وحيث أن زمن التصادم وكذلك القوة المؤثرة أثناء التصادم لاتكون عادة معروفة تماماً، فمن المعتاد إدماج حاصل الضرب Ft فى كمية واحدة تسمى **الدفع** . باستخدام هذه المصطلحات الفنية يمكننا القول أن التغير فى كمية تحرك جسم ما يساوى الدفع المؤثر عليه .

مثال توضيحى ٦ - ١ : سيارة متحركة كتلتها **1500 kg** أنقصت سرعتها من **20 m** ألى **15 m/s** فى زمن قدره **3.0 s** . ماهو متوسط القوة المعوقة ؟

طريقة الحل : بتطبيق المعادلة (٦ - ١) أو (٦ - ٢) نجد أن :

$$Ft = mv - mv_0$$
$$F(3\ \text{s}) = (1500\ \text{kg})(15\ \text{m/s}) - (1500\ \text{kg})(20\ \text{m/s})$$

ومنه نجد أن $F = -2500$ N . وتبين الاشارة السالبة أن القوة معوقة لحركة السيارة .

مثال توضيحى ٦ – ٢ : يتحرك الكترون بسرعة قدرها 2.6×10^{8} m/s وكتلته 18.0×10^{-31} kg وهو مايساوى ضعف كتلة السكون للالكترون وهى 9.1×10^{-31} kg . ماهو متوسط القوة F اللازمة لتعجيل الالكترون الى هذه السرعة من سرعة ابتدائية قدرها 1.0×10^{8} m/s فى زمن قدره 1.0×10^{-7} s ؟ كتلة الإلكترون عند هذه السرعة الأقل تساوى 9.5×10^{-31} kg (سنناقش تغير كتلة الجسيمات المتحركة بسرعة عالية فى الفصل السادس والعشرين) .

طريقة الحل : بتطبيق المعادلة (٦ – ٣) نجد أن :

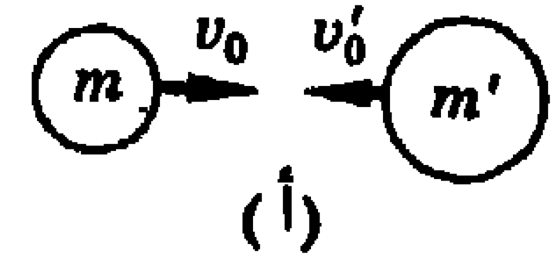
$$Ft = mv - m_0v_0$$

$$F(10^{-7}\,\text{s}) = (18 \times 10^{-31}\,\text{kg})(2.6 \times 10^{8}\,\text{m/s}) - (9.5 \times 10^{-31}\,\text{kg})(1 \times 10^{8}\,\text{m/s})$$

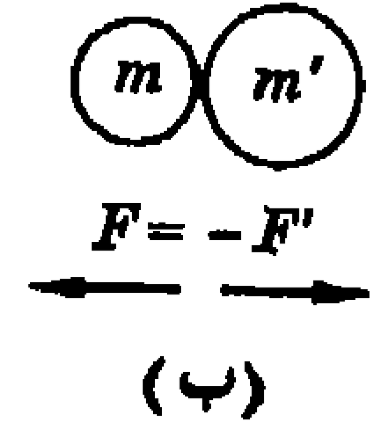
أو :

$$F \approx 47 \times 10^{-16} - 9.5 \times 10^{-16}\,\text{N} \approx 37 \times 10^{-16}\,\text{N}$$

٦ – ٣ بقاء كمية التحرك



(أ)



(ب)



(ج)

شكل (٦ – ٢)
عند تصادم الجسمين تكون القوة المؤثرة على أحدهما مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه للقوة المؤثرة على الآخر . كمية التحرك محفوظة أثناء التصادم .

تأمل تصادم الجسمين المبينين فى شكل ٦ – ٢ . هذان الجسمان قد يكونان كرتين أو جزءين كرويين أو ماشابه ذلك . ولأغراضنا الخاصة يمكننا أن نعتبر أن الجسمين كون قائم بذاته أى أنهما معزولان عن جميع الأجسام الأخرى . وطبقا لقانون نيوتن الثالث ، اذا وجدت قوة مؤثرة على أحد الجسيمات فلابد أن توجد قوة رد فعل مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه مؤثرة على جسم آخر فى الكون . وفى هذه الحالة الخاصة لابد أن تؤثر قوة رد الفعل على الجسم الآخر وتؤدى هذه الحقيقة الى قانون بقاء هام وقيم للغاية .

لنحسب التغير فى كمية تحرك الجسم الأيسر فى شكل ٦ – ٢ للتصادم . يمكننا استخدام المعادلة (٦ – ٢) أو (٦ – ٣) لايجاد متوسط القوة :

$$\mathbf{F}t = m\mathbf{v} - m\mathbf{v}_0$$

بالمثل ، فى حالة الجسيم الأيمن :

$$\mathbf{F}'t = m'\mathbf{v}' - m'\mathbf{v}_0'$$

وبجمع هاتين المعادلتين نحصل على :

$$(\mathbf{F} + \mathbf{F}')t = (m\mathbf{v} - m\mathbf{v}_0) + (m'\mathbf{v}' - m'\mathbf{v}_0')$$

وحيث أن القوة المتجهة **F** وهى قوة الفعل مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه لقوة رد الفعل **F'** ، فإن **F = F'** ، وعليه فإن الطرف الأيسر للمعادلة السابقة يساوى صفرا . إذن :

$$0 = (m\mathbf{v} - m\mathbf{v}_0) + (m'\mathbf{v}' - m'\mathbf{v}_0')$$

أى أن : مجموع التغير فى كمية تحرك الكرة الأولى والتغير فى كمية تحرك الكرة الثانية يساوى صفرا .

0 = change in momentum of 1st ball
+ change in momentum of 2d ball

وهكذا فان التغير الكلى فى كمية تحرك كون معزول يتكون من جسيمين يساوى صفرا .

من الممكن تعميم هذه الطريقة فى التفكير على الأنظمة الأكثر تعقيدا . لتحقيق ذلك يلزمنا أن نعرف مايسمى بالنظام المعزول . **النظام المعزول هو مجموعة من الأجسام محصلة القوى التى تؤثر عليها من الخارج تساوى صفرا** . فمثلا ، الكون ككل هو نظام معزول . فى هذا النظام ، لكل قوة مؤثرة على أحد الأجسام هناك قوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه تؤثر على جسم آخر . ونتيجة لذلك فإن التغير فى كمية حركة الأجسام مأخوذة ككل يساوى دائمًا صفرا .

تعريف

قانون بقاء كمية التحرك الخطى

وتنطبق هذه الاعتبارات على أى نظام معزول ، ويمكن تلخيصها فى **قانون بقاء كمية التحرك الخطى** الذى ينص على الآتى :

كمية التحرك الكلية لنظام معزول من الأجسام ثابتة .

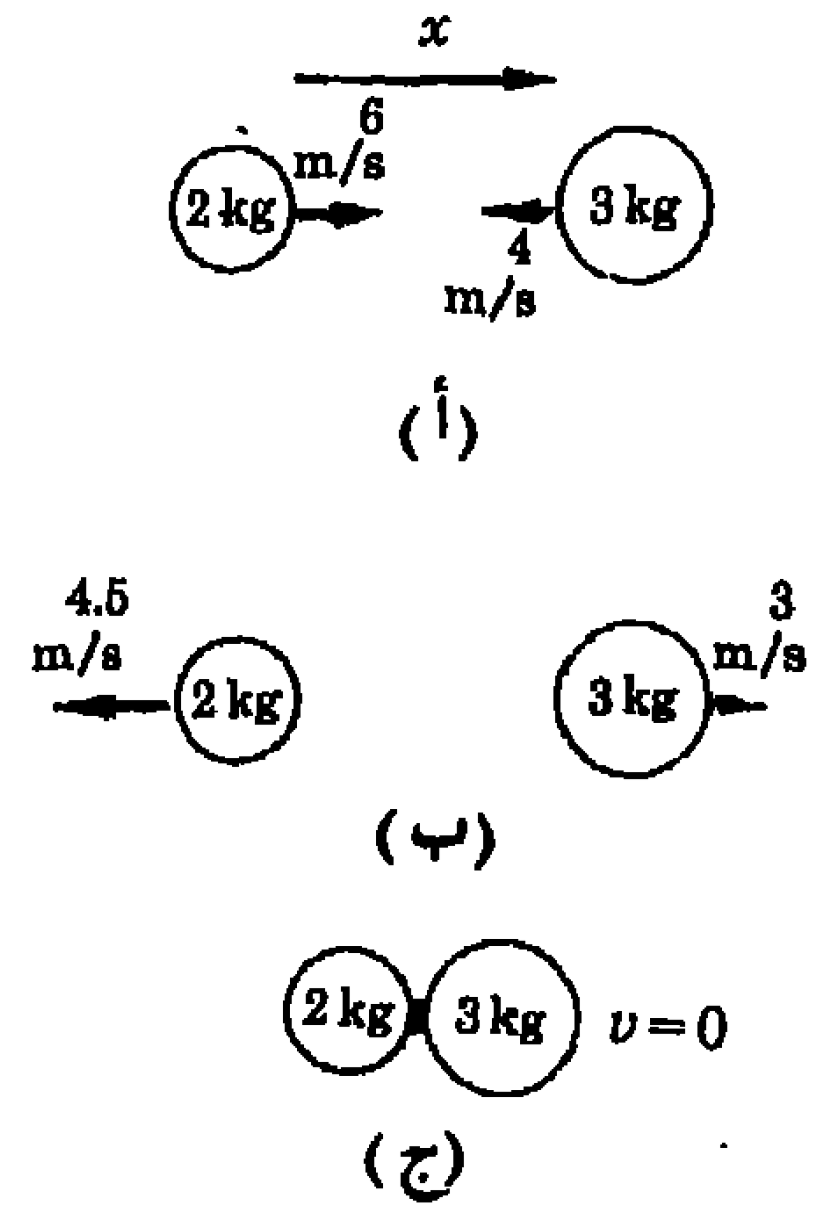
وحتى اذا لم تكن الأجسام معزولة تماما فان هذا القانون يكون نافعا فى حالات كثيرة . فمثلا عند اصطدام سيارتين يسبب تزحلق العجلات على الطريق المرصوف ظهور قوى خارجية تؤثر على النظام المكون من السيارتين . وحتى فى هذه الحالة تكون القوى التى تؤثر بها احدى السيارتين على الأخرى فى لحظة التصادم عادة كبيرة جدا ، أكبر كثيرا من قوى التزحلق المؤثرة على الطريق . وهكذا فإن التغيرات الكبيرة فى كمية التحرك التى تحدث فى لحظة التصادم تنتج جميعها تقريبا كنتيجة للقوة التى تؤثر بها احدى السيارتين على الأخرى . نتيجة لذلك ، لازال من الممكن تطبيق قانون بقاء كمية التحرك على النظام المكون من السيارتين فى لحظة التصادم بالرغم من ان النظام ليس معزولا .

عند تطبيق قانون بقاء كمية التحرك يجب أن نلاحظ أن كمية تحرك الجسم كمية متجهة . لتوضيح أهمية ذلك لنرجع الى الشكل ٦ — ٣ . بأخذ الاتجاه x كاتجاه موجب ، يمكن كتابة كمية التحرك الكلية قبل التصادم (شكل ٦ — ٣ أ) على الصورة :

$$\text{كمية التحرك قبل التصادم} = mv_0 + m'v'_0$$
$$= (2\text{ kg})(6\text{ m/s}) + (3\text{ kg})(-4\text{ m/s})$$
$$= 12 - 12 = 0$$

لاحظ أنه بالرغم من أن كلا من الجسمين كانت له كمية تحرك قبل التصادم ، فإن كمية تحرك النظام ككل تساوى صفرا . وهذه بالطبع حالة خاصة بسيطة اختيرت لتوضيح هذه الحقيقة المثيرة أن كمية التحرك متجهة . ومع ذلك فإن هذه الحالة الخاصة التى يكون فيها كمية التحرك الكلية مساوية للصفر هامة فى كثير من الوجوه .

ماذا يحدث بعد التصادم ؟ يخبرنا قانون بقاء كمية التحرك أن كمية التحرك لهذا النظام المعزول لن تتغير نتيجة للتصادم . وعليه ففى هذه الحالة لابد أن تكون كمية التحرك بعد التصادم مساوية للصفر . لإثبات ذلك من الممكن استخدام الطريقة الموضحة فى الجزء ب من شكل ٦ — ٣ . لاحظ أن مقدار كمية تحرك كل من الجسمين هو 9 kg. m/s ولكن كمية التحرك موجبة لأحد الجسمين وسالبة للآخر . وهذا بالتأكيد حل ممكن لهذه المسألة لأن كمية التحرك محفوظة . ومع ذلك فلنا الحق أن نتساءل عما اذا كان هذا هو الحل الوحيد الممكن للمسألة .



شكل (٦ - ٣)
الحالتان الموضحتان فى (ب) و (جـ) هما نتيجتان ممكنتان من الناحية الفيزيائية لتصادم الجسمين الموضحين فى (أ) . فى كلتا الحالتين لابد أن تكون كمية التحرك بعد التصادم مساوية لكمية التحرك قبل التصادم ، أى صفرا . وعليه فان كمية التحرك محفوظة بالرغم من أن KE ليست كذلك

من السهل إثبات أن الحل الموضح فى شكل ٦ — ٣ ب ليس هو الحل الوحيد الصحيح فى حالة معينة . لنفرض أن أحد الجسمين كان يحمل قطعة من العلك (اللبان) ملتصقة على الجانب الذى يحدث فيه التصادم . واذا كانت العلك لزجة بدرجة كافية فان الجسمين سوف يلتصقان سويا بعد التصادم . (اذا لم تعجبك هذه الطريقة لتثبيت الجسمين معا يمكنك استخدام مغناطيسين على الجسمين لتثبيتهما معا . وربما أمكنك أن تفكر فى طرق أخرى لتحقيق ذلك ، ماذا يمكن أن يفعله هذان الجسمان بعد أن يلتصقا معا ؟

يُمَكِّننا قانون بقاء كمية التحرك من الاجابة على هذا السؤال . حيث أن كمية تحرك النظام قبل التصادم تساوى صفرا فإنه يجب أن يساوى صفرا كذلك بعد التصادم . ولكن حيث أن الجسمين قد التصقا الآن معا فإنهما يجب أن يتحركا كوحدة واحدة ، وعندئذ ستكون سرعتاهما فى نفس الاتجاه . ومن ثم فليست هناك امكانية اطلاقا لأن تتعادل كمية تحرك أحد الجسمين مع الأخرى بعد التصادم . نستنتج من ذلك أن الطريقة الوحيدة التى يمكن أن تجعل كمية التحرك بعد التصادم مساوية للصفر اذا التصق الجسمان هو أن يسكن الجسمان بعد التصادم . فى هذه الحالة إذن سوف يتصادم الجسمان ثم يلتصقان ويتوقفان نهائيا عن الحركة .

وبالطبع فإن الحالة السابقة بسيطة جدا ، وهى إحدى أبسط الحالات التى يمكن تصورها مع ذلك . وحتى فى هذه الحالة لايمكننا أن نعطى إجابة كاملة ومحددة على السؤال : ماذا يحدث عند تصادم جسمين كميتا تحركهما متساويتان فى المقدار ومتضادتان فى الاتجاه ؟ وقد يبدو الموقف أكثر خداعا اذا لاحظنا أن طاقة حركة

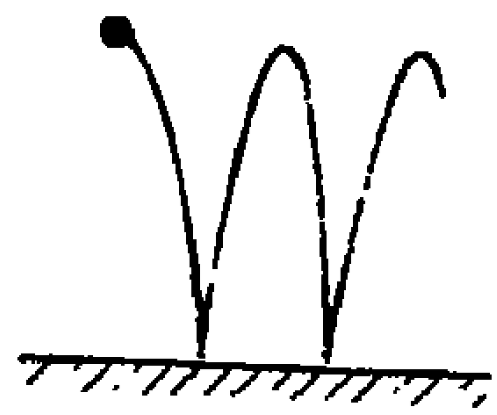
النظام قبل التصادم تساوى طاقة حركته بعد التصادم فى كل من الحلين المعطيين فى شكل ٦ – ٣ . ويبدو أن KE ليست دائما محفوظة فى عمليات التصادم . وسوف نحتاج الى معرفة كمية KE المفقودة فى التصادم قبل أن نتمكن من ايجاد الاجابة الصحيحة على السؤال السابق ذكره .

٦ – ٤ التصادم المرن وغير المرن

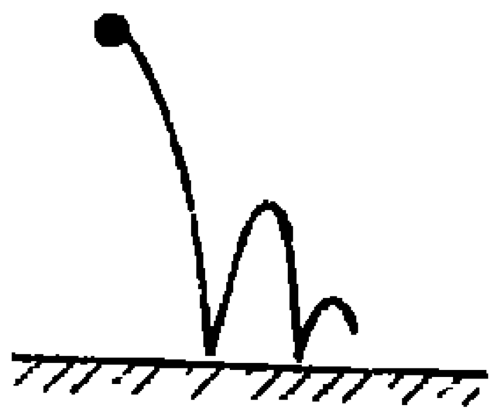
ماذا حدث لطاقة حركة الجسمين المذكورين فى الجزء السابق عندما تصادما والتصقا معا ؟ من المحتمل أن يكون الجزء الأكبر من الطاقة قد فقد فى بذل الشغل على قطعة العلك الموجودة بين الجسمين مسببة انبعاجها تحت تأثير قوة التصادم . وتظهر هذه الطاقة فى آخر الأمر على صورة طاقة حرارية . بالإضافة إلى ذلك من المحتمل أن ينبعث جزء من الطاقة على هيئة موجات صوتية . وعلى أى حال فان KE تتحول كلية الى صور أخرى من الطاقة . ويسمى التصادم الذى يحدث فيه ذلك **بالتصادم غير المرن تماما** .

شكل (٦ – ٤)
فى التصادم المرن التام تكون طاقة الحركة محفوظة . أما اذا كان التصادم غير مرن تماما فان طاقة الحركة تفقد بأكملها .

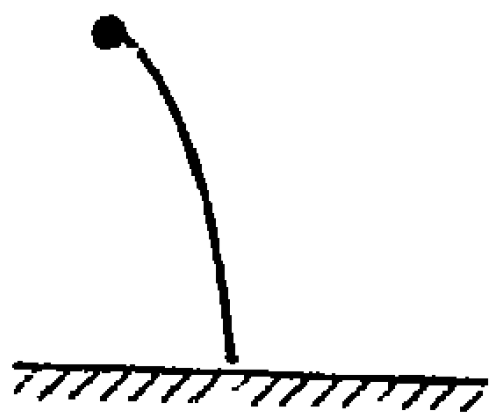
واذا كان الجسمان المتصادمان كرتى تنس فان جزءا معينا من KE سوف يفقد ، وعليه فان كلا من الكرتين سوف ترتد مبتعدة عن الأخرى بعد التصادم . وبالرغم من ذلك فان الطاقة المفقودة على صورة احتكاك عندما تتحرك الجزيئات فى الكرة على بعضها عند انبعاج الكرة ، وكذلك الطاقة المفقودة على هيئة صوت وصور أخرى ستسبب نقص KE بعد التصادم عنها قبل التصادم . ويعرف التصادم الذى تفقد فيه KE **بالتصادم غير المرن** .


مرن تماما (تام المرونة)

وفى حالات خاصة معنية لاتفقد أى طاقة تقريبا أثناء التصادم . وفى الحالة المثالية ، عندما لايحدث أى فقد لطاقة الحركة اطلاقا ، يقال أن **التصادم مرن تماما** . ومن أمثلة هذا النوع من التصادم كرة صلدة تسقط على جسم صلد ثقيل مثل أرضية من الرخام وارتدادها الى نفس ارتفاع نقطة البداية تقريبا مع فقد كمية مهملة من الطاقة فى التصادم مع الأرضية .


غير مرن

هذه الأنواع الثلاثة من السلوك أثناء التصادم مع جسم ثقيل موضحة فى شكل ٦ – ٤ . وفى الحقيقة فإن النقص فى الارتفاع عند الارتداد هو طريقة معتادة لاختبار رجوعية المواد المختلفة . ومن الواضح أنه إذا أسقطت كرة من ارتفاع قدره h ثم ارتفعت بعد الارتداد الى ارتفاع قدره h_2 فإن النقص فى طاقة وضع الكرة عند هذين الارتفاعين هو الطاقة التى فقدتها الكرة عند التصادم . وحتى بالنسبة لجسم عالى المرونة مثل كرة مصمتة من المطاط فان الارتفاع النهائى الذى تصل اليه الكرة بعد الارتداد يمثل فقط حوالى 75% من الارتفاع الابتدائى (تستطيع الكرة السوبر Super ball أن تصل الى ارتفاع اكبر من ذلك) .


غير مرن تماما

تتولد كمية كبيرة من الحرارة فى الكرة عند التصادم نتيجة لاحتكاك جزيئاتها كل منها بالأخرى عندما تتشوه الكرة أثناء التصادم . وحيث أن هذه الظاهرة لاتتضمن أى مادة صلدة ، فليس من الغريب أن تفقد كرة معدنية صغيرة عند التصادم كمية من الطاقة أقل من تلك التى تفقدها كرة من المطاط . لذلك فإن الكرة المعدنية ترتد أحسن من الكرة المطاطية .



(أ) قبل التصادم

مثال توضيحى ٦ - ٣ : اصطدمت شاحنة وزنها 6400 lb متحركة بسرعة قدرها 30ft/s بسيارة وزنها 3200 lb تسير فى الاتجاه المعاكس بسرعة قدرها 90 ft/s. فإذا التصقت السيارتان بعد التصادم ، فبأى سرعة وفى أى اتجاه سيتحركان ؟ (انظر شكل ٦ - ٥) .

$v = v'$



(ب) بعد التصادم

شكل (٦ - ٥)
تصادم الشاحنة والسيارة غير مرن تماما فى هذه الحالة . ومع ذلك ، فإن كمية التحرك يجب أن تظل محفوظة .

طريقة الحل : لنعتبر أن الاتجاه x هو الاتجاه الموجب ثم نطبق قانون بقاء كمية التحرك (من الواضح أن KE ليست محفوظة فى هذا التصادم) . لنفرض أن v هى السرعة المشتركة للسيارتين بعد التصادم .

كمية التحرك بعد التصادم = كمية التحرك قبل التصادم

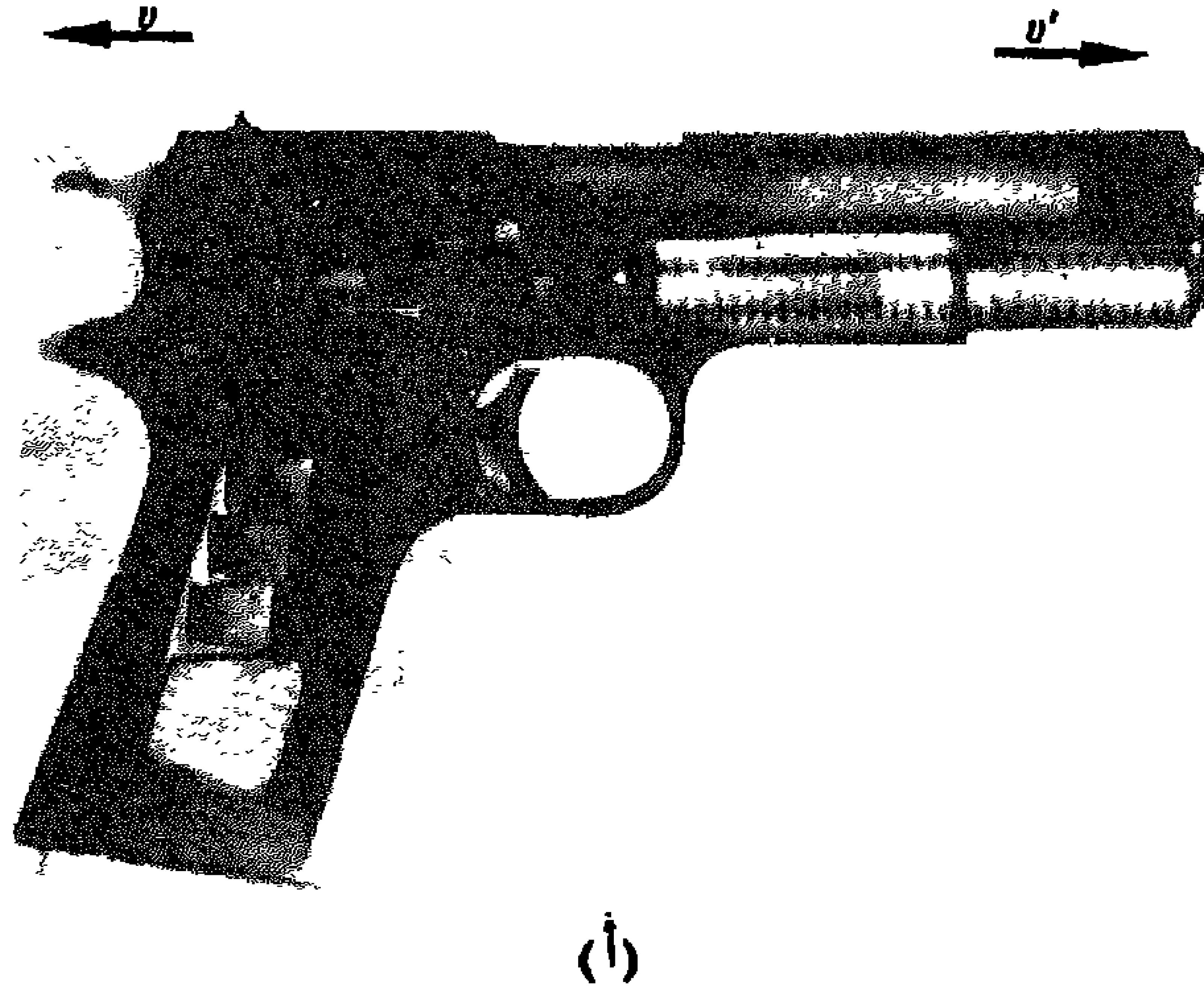
$$\text{Momentum before} = \text{momentum after}$$
$$(m_1 v_{01})_{\text{truck}} + (m_2 v_{02})_{\text{car}} = (m_1 + m_2)v$$
$$\left(\frac{64,000}{32}\right)(30) + \left(\frac{3200}{32}\right)(-90) = \left(\frac{64,000 + 3200}{32}\right)v$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة الى v سنجد أن $v = 24.3$ ft/s . وتبين الاشارة الموجبة أن الحركة النهائية فى الاتجاه الموجب من المحور x ، أى فى نفس الاتجاه الذى كانت الشاحنة تتحرك فيه .

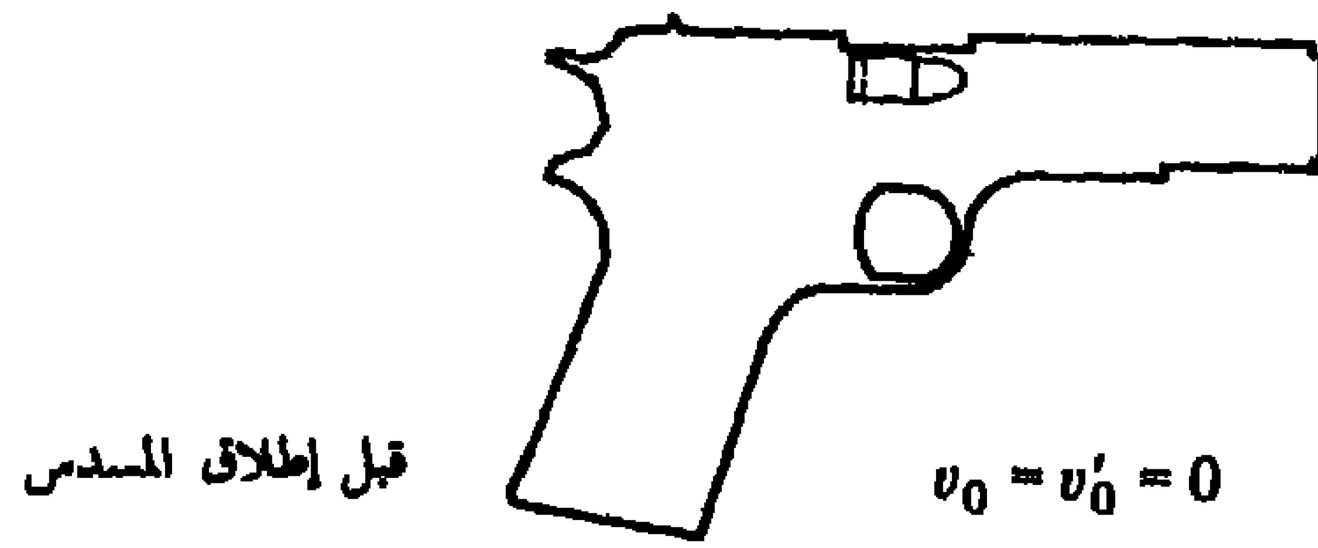
لاحظ أن سرعة الشاحنة قد نقصت قليلا ، بينما انعكس اتجاه حركة السيارة تماما . من المفيد تقدير متوسط القوة التى تؤثر على سائق السيارة أثناء التصادم ، ولكننا سنترك هذا كتمرين . (إذا أردت حساب هذه القوة لاحظ أن الدفع المؤثر على السائق يساوى التغير فى كمية تحركه) . وسوف تحتاج أيضا الى معرفة زمن التصادم ، واحدى الطرق لتحقيق ذلك هو إيجاد الزمن اللازم للسيارة لكى تتحرك مسافة تساوى تقريبا طول سقف السيارة . لماذا ؟)

مثال توضيحى ٦ - ٤ : يمثل الشكل ٦ - ٦ أ صورة بالأشعة السينية لمسدس بعد انطلاق الرصاصة مباشرة . تسبب غازات الاحتراق الناتجة عن انفجار البارود تسارع الجزء المقذوف من الرصاصة فى ماسورة المسدس الى الخارج . فاذا كانت M و m هما كتلتا المسدس والمقذوف على الترتيب وكانت سرعة خروج المقذوف هى v' ، اوجد سرعة ارتداد المسدس .

طريقة الحل : اذا نظرت بعناية الى الصورة يمكنك أن ترى اليد التى تحمل المسدس . ولكن القوة الخارجية التى تؤثر بها هذه اليد على نظام المسدس صغيرة بالمقارنة بالقوى الداخلية الناتجة من انفجار البارود . يمكننا اذن أن نفترض أن المسدس معزول عند لحظة الانفجار وأن كمية التحرك محفوظة ، ويوضح هذا الموقف فى شكل ٦ – ٦ ب . أى أن :



(أ)





(ب)

شكل (٦ – ٦)
قبل اطلاق المسدس كانت كمية تحركه صفرا . وعليه فان مجموع كميتى التحرك لابد أن يساوى صفرا بعد إطلاقها . ((أ) هيوليت – باكارد . ، اخذت الصورة باستخدام جهاز الأشعة السينية الوميضى) .*

كمية التحرك بعد التصادم مباشرة = كمية التحرك قبل التصادم مباشرة

Momentum just before = momentum just after'

$$mv'_0 + Mv_0 = mv' + Mv$$

وحيث أن $v_0' = v_0 = 0$ فإن المعادلة السابقة تصبح :

$$0 = mv' + Mv$$

إذن ، سرعة ارتداد المسدس هى :

$$v = -\frac{m}{M}v'$$

لاحظ أنه كلما زادت كتلة المسدس كلما قلت سرعة الارتداد .

مثال توضيحى ٦ – ٥ : افترض فى المثال السابق أن $m/M = 1/150$ وأن $v' = 200$ m/s . افترض أيضا أن المسدس يرتد 2.5 cm عندما توقفها اليد التى تحملها . ماهو متوسط القوة التى يؤثر بها المسدس على اليد ؟ اعتبر أن كتلة المسدس 1.25 kg .

طريقة الحل : تعطى طاقة حركة المسدس بعد انطلاق الرصاصة بالعلاقة

$$\text{طاقة حركة المسدس} = \tfrac{1}{2}Mv^2 = \tfrac{1}{2}M\left(\frac{m}{M}\right)^2 v'^2 = 0.889M \quad \text{joules}$$

$$= 1.11 \text{ J}$$

وتفقد هذه الطاقة فى بذل الشغل ضد اليد التى تحمل المسدس . وبفرض أن F هى متوسط القوة المعاكسة التى تؤثر بها اليد وأن مسافة الارتداد هى 0.025 m ، فان :

طاقة حركة المسدس = الشغل المبذول

Work done = gun's KE

$$(F)(0.025) = 1.11$$

ومنه :

$$F = 44 \text{ N}$$

هل يمكنك أن تذكر بعض العوامل التى تعتمد عليها ركلة البندقية أو بندقية الرش .

مثال توضيحى ٦ – ٦ : تتحرك كرة كتلتها 40 g الى اليمين بسرعة قدرها 30 cm/s ثم تصطدم اصطداما مباشرا بكرة ساكنة كتلتها 80 g . اوجد سرعة كل من الكرتين بعد التصادم بفرض أن التصادم مرن تماما . (نعنى بكلمة مباشر أن الحركة تتم فى خط مستقيم) .

طريقة الحل : كمية التحرك محفوظة أثناء التصادم . اذن ، باعتبار أن سرعتى الكرتين اللتين كتلتهما 40 g و 80 g هما v و v' على الترتيب نجد أن :

كمية التحرك بعد التصادم = كمية التحرك قبل التصادم

Momentum before = momentum after

أو :

$$(0.04\ \text{kg})(0.3\ \text{m/s}) + 0 = (0.04\ \text{kg})v + (0.08\ \text{kg})v$$
$$2v' + v = 0.30\ \text{m/s}$$

لازلنا فى حاجة الى معادلة أخرى لأن لدينا مجهولين هما v' و v . وحيث أن التصادم مرن تماما فان KE محفوظة أيضا . اذن :

طاقة الحركة بعد التصادم = طاقة الحركة قبل التصادم

$$\text{KE before} = \text{KE after}$$

أو :

$$\tfrac{1}{2}(0.04\ \text{kg})(0.3\ \text{m/s})^2 + 0 = \tfrac{1}{2}(0.04\ \text{kg})v^2 + \tfrac{1}{2}(0.08\ \text{kg})v'^2$$
$$2v'^2 + v^2 = 0.090\ \text{m}^2/\text{s}^2$$

وبحل المعادلة الأولى بالنسبة الى v والتعويض فى هذه المعادلة نحصل على :

$$6v'^2 - (1.2\ \text{m/s})v' = 0$$

النسبية

قدم البرت اينشتين نظريته النسبية الخاصة فى عام ١٩٠٥ . وسوف تناقش هذه النظرية بالتفصيل فى الفصل السادس والعشرين. ولكننا نكتفى فى هذه المقالة القصيرة بتلخيص بعض الملامح الهامة لهذا التقدم الخطير فى فهمنا للطبيعة .

أثبتت تجارب عديدة من أنواع مختلفة الحقائق التالية :

١ – تتحرك نبضة من الضوء فى الفراغ دائما بسرعة ثابتة قدرها $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s ، ولاتتغير هذه السرعة حتى اذا كان المصدر الضوئى متحركا .

٢ – اعتبر مختبرين متحركين بسرعتين مختلفتين ولكن ثابتتين . تؤدى التجارب الدقيقة التى تجرى فى أى من المختبرين دائما الى نفس القوانين الفيزيائية . ولهذا فمن المستحيل تعيين السرعة المطلقة للمختبر من قياسات تجرى فى نفس هذا المختبر فقط .

وقد أثبت اينشتين أن هاتين الحقيقتين تؤديان الى الاستنتاجات التالية . (وقد اختبرت هاتان الحقيقتان بعمل التنبؤات المبنية على أساسهما ، وقد وجد عند اختبار هذه التنبؤات أنها جميعها صحيحة . ونحن نسمى النظرية التى تستخلص منها هذه الاستنتاجات **بالنظرية النسبية الخاصة**) .

١ – لايمكن تسارع أى جسم ذى طاقة إلى سرعات أكبر من سرعة الضوء فى الفراغ c .

٢ – لنفرض أن جسما يتحرك أمامك بسرعة قدرها v . عندئذ ستبدو لك جميع العمليات التى تحدث فى داخل الجسم كما لو كانت أبطأ مما هى فى الحقيقة . فمثلا ، إذا كان الجسم الذى يطير مارا فى محاذاتك هو ساعة حائط ، ستبدو لك دقاتها بطيئة جدا ، فاذا كانت ساعتك تدق زمنا قدره t_0 فان الساعة المتحركة ستبدو لك كما لو كانت تدق زمنا قدره :

$$t_0\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

وتسمى هذه الظاهرة **استطالة الزمن** .

٣ – لنفرض أن جسما يتحرك فى اتجاه المحور x بسرعة قدرها v مارا فى محاذاتك . فى هذه الحالة ستبدو لك أبعاد الجسم فى الاتجاه x كما لو كانت أقصر من الحقيقة . عندئذ سوف تقيس الطول L_0 كما لو كان مساويا للمقدار :

$$L_0\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

ويحدث هذا التناقض فى اتجاه الحركة فقط ، ولايحدث أى تغير فى أبعاد الجسم فى الاتجاهين y و z .

٤ - لنفرض أن جسما كتلته m_0 موجود فى حالة السكون بجانبك . تسمى هذه الكتلة **بكتلة السكون** . اذا تحرك نفس الجسم بمحاذاتك فستبدو كتلته أكبر من ذلك . وتعطى كتلته فى حالة الحركة بالعلاقة :

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

لاحظ أنه عندما تكون سرعة الجسم مساوية لسرعة الضوء فى الفراغ ، أى $v=c$ ، فان كتلة الجسم ستكون لانهائية فى الكبر . لهذا السبب لابد أن تكون القوى اللازمة لتسارع الجسم الى السرعة c لانهائية وهذا يفسر جزئيا النتيجة (المذكورة سابقا) .

٥ - الكتلة والطاقة قابلتان للتبادل . فاذا زادت طاقة الجسم بمقدار ΔE بأية طريقة فإن كتلة الجسم ستزداد بمقدار Δm . كذلك فإن الكتلة تتحطم منتجة الطاقة كما يحدث فى المفاعلات النووية . وترتبط الكتلة والطاقة بالعلاقة :

$$\Delta E=\Delta m\, c^2$$

وعلى وجه الخصوص ، اذا كان للجسم طاقة حركة KE فإن كتلته ستكون m ، حيث :

$$\mathrm{KE}=(m-m_0)c^2$$

وبالتعويض عن m من العلاقة $m=m_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$ واستعمال التقريب $v/c \ll 1$ فاننا سنحصل على العلاقة المعروفة لطاقة الحركة وهى $\mathrm{KE}=\frac{1}{2}m_0v^2$.

يعتبر المعامل النسبى $\sqrt{1-(v/c)^2}$ كمية هامة فى معظم هذه النتائج . فاذا كان هذا المعامل قريبا جدا من الوحدة فان $m\approx m_0$ ، $t\approx t_0$ ، $L\approx L_0$ ، $\mathrm{KE}\approx\frac{1}{2}m_0v^2$. أما اذا كان $v/c\to 1$ فإن التأثيرات السابق ذكرها ستكون هامة . وكقاعدة تقريبية يمكننا اعتبار السرعة $v=3\times10^7$ m/s كحد فاصل . وتكون التأثيرات النسبية غير هامة فى حالة السرعات الأقل من هذه السرعة (عشر سرعة الضوء) . وسوف نناقش هذا الموضوع بتفصيل أكثر فى الفصل السادس والعشرين .

وعليه ، هناك اجابتان ممكنتان وهما بالتحديد 0 و 0.20 m/s . بالتعويض عن هاتين المعادلتين فى المعادلةالأولى نحصل على 0.3 m/s و 0.10 m/s - لقيمة v .

وتعنى الاجابة الأولى أن الكرة الأولى قد سارت الى اليمين خلال الكرة الثانية . وحيث أن هذا مستحيل فيزيائيا فإننا ننبذ هذه الاجابة . وهكذا فإننا نجد أن الكرة الأولى تسير بعد التصادم الى اليسار بسرعة قدرها 10 cm/s بينما تسير الثانية الى اليمين بسرعة قدرها 20 cm/s .

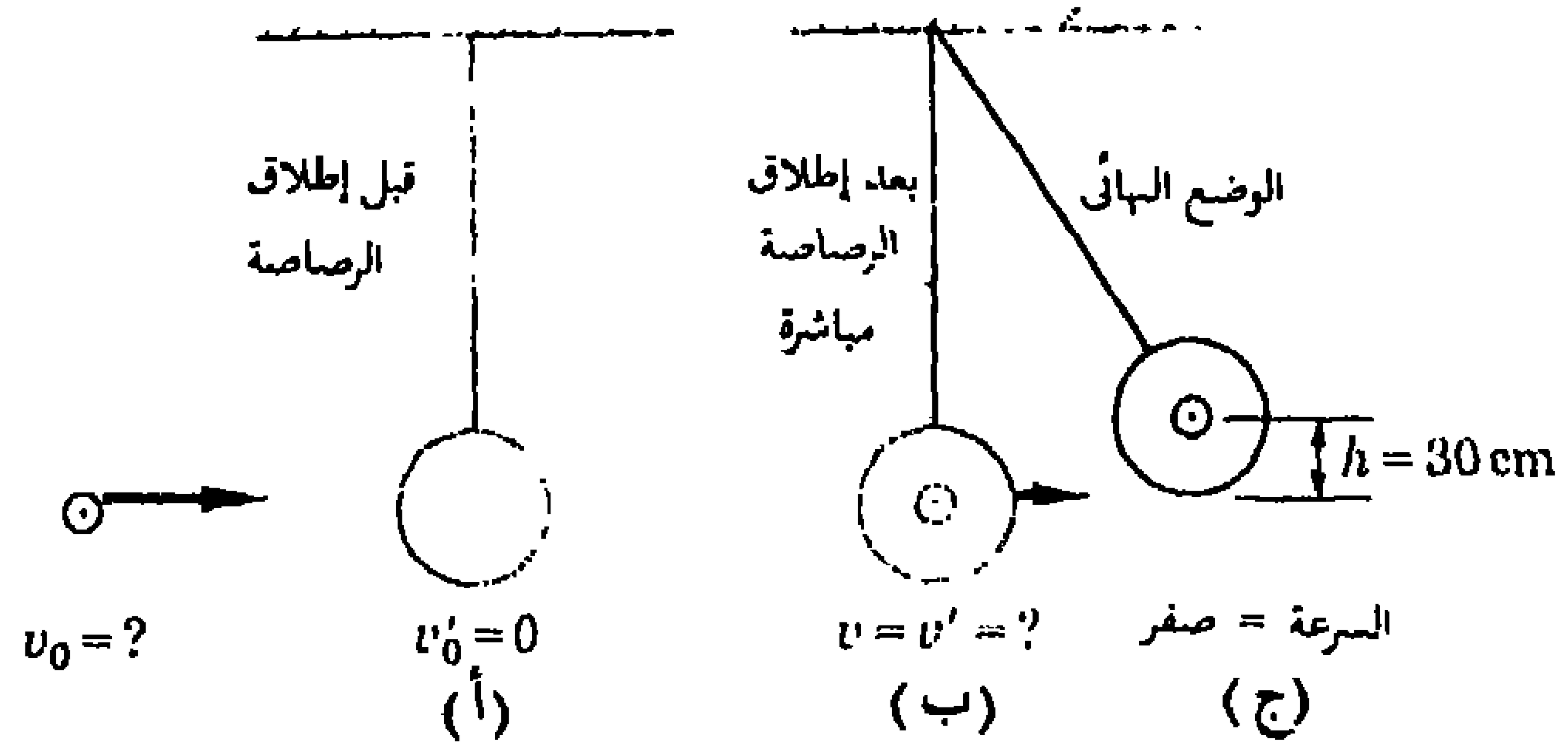
مثال توضيحى ٦ - ٧ : اطلقت رصاصة كتلتها 10 g بسرعة غير معلومة فى قالب من الخشب معلق بحبل فى السقف . اخترقت الرصاصة القالب ثم استقرت بداخله . ونتيجة لذلك تأرجح القالب والرصاصة بداخله بعد التصادم الى ارتفاع قدره 30 cm

موف الموضع الأصلى (أنظر شكل ٦ - ٧أ ، ب ، جـ) . ماهى سرعة انطلاق الرصاصة ؟ (يسمى هذا الجهاز **البندول القذفى**)

طريقة الحل : KE ليست محفوظة عند التصادم . ومع ذلك ، فبعد التصادم يتحول مجموع طاقتى حركة الرصاصة والقالب الى طاقة وضع PE . وعليه فعند الإنتقال من شكل ٦ - ٧ أ الى جـ يمكننا أن نكتب (تذكر أن كل ذلك بعد التصادم) :

طاقة الوضع عند القمة = طاقة الحركة عند القاع

$$\text{KE at bottom} = \text{PE at top}$$
$$\tfrac{1}{2}(2.000 + 0.010)v^2 = (2.000 + 0.010)(9.8)(0.30)$$
$$v \approx 2.4 \text{ m/s}$$



شكل (٦ - ٧)
كمية التحرك متساوية فى (أ) و (ب) ولكن ليس فى (جـ) . تتحول KE الى PE عند الانتقال من (ب) الى (جـ) .

وهذه هى سرعة القالب والرصاصة بعد التصادم مباشرة . يجب عليك أن تعوض بالوحدات فى المعادلة السابقة للتحقق من وحدات v المذكورة .

والآن عند الانتقال من الجزء أ الى الجزء ب يكون التصادم قد حدث . فى هذه الحالة تكون كمية التحرك محفوظة ولكن KE ليست كذلك . واذا رمزنا للسرعة الابتدائية للرصاصة بالرمز v_0 فإن :

كمية التحرك بعد التصادم = كمية التحرك قبل التصادم

$$(0.010 \text{ kg})v_0 + 0 = (2.000 + 0.010)(2.4) \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$
$$v_0 \approx 480 \text{ m/s}$$

وعليه فإن السرعة الابتدائية للرصاصة هى 480 m/s .

٦ - ٥ الدفع النفثى والصاروخى

من الأمثلة المثيرة لاستخدام قانون بقاء كمية التحرك تطبيقه على الدفع النفثى للصواريخ وسفن الفضاء والطائرات النفاثة . ويعتمد عمل جميع هذه الأجهزة على حدوث الارتداد عندما يقذف الجسم جزءا من كتلته خارجه . وتشبه جميع هذه الأجهزة المسدس أو المدفع الذى يرتد عندما ينطلق المقذوف .

يحترق الوقود فى المحركات النفاثة والصواريخ وتتكون فى هذه العملية غازات ساخنة جدا . وتنطلق الجزيئات الغازية المتحركة بسرعة عالية من مؤخرة المحرك النفاث أو الصاروخى مثل تيار من الرصاصات المنطلقة من بندقية تكرارية خيالية السرعة . وكما ترتد البندقية فإن الصاروخ وسفينة الفضاء ترتد أيضا فى الإتجاه المعاكس لحركة الغاز . وحيث أن الجزيئات الغازية قد اكتسبت كمية تحرك فى الإتجاه الى الخلف فإن الصاروخ يجب أن يكتسب كمية تحرك فى الاتجاه المعاكس (الى الأمام) لأن كمية التحرك محفوظة .

ويبين الفحص الدقيق لهذا النوع من أجهزة الدفع أن داخل المحرك يدفع الجزيئات الغازية الساخنة بحيث تنطلق أساسا فى الإتجاه الى الخلف . ولكن ، طبقا لقانون الفعل ورد الفعل لنيوتن ، تبذل الجزيئات الغازية فى هذه العملية قوة الى الأمام على المحرك ، دافعة الصاروخ بذلك الى الأمام . وتحدث هاتان القوتان فى داخل المحرك نفسه ولاتؤثر على السفينة أى قوة من الخارج . من هذا يتضح أن السفينة لاتدفع نتيجة للفعل المتبادل بين الغازات الساخنة المطرودة والمحيط الجوى . وفى الحقيقة فإن الصاروخ يعمل بأحسن الطرق فى الفضاء الخارجى حيث الهواء غير موجود ، إذ أن الهواء يتسبب فى ظهور قوة احتكاك تعوق حركة الصاروخ . لذلك فإن الهواء غير مرغوب فيه .

مثال توضيحى ٦ – ٨ : يقذف صاروخ قنطورس Centaur rocket الغاز الساخن من محركه بمعدل قدره 1300 kg/s وكانت سرعة الجزيئات 50,000 m/s بالنسبة الى الصاروخ . ماهى قيمة **الدفع** الى الأمام الذى تعطيه الغازات الخارجة للصاروخ ؟

طريقة الحل : الدفع المؤثر على الغاز المنطلق الى الخارج فى كل ثانية يعطى بالعلاقة :

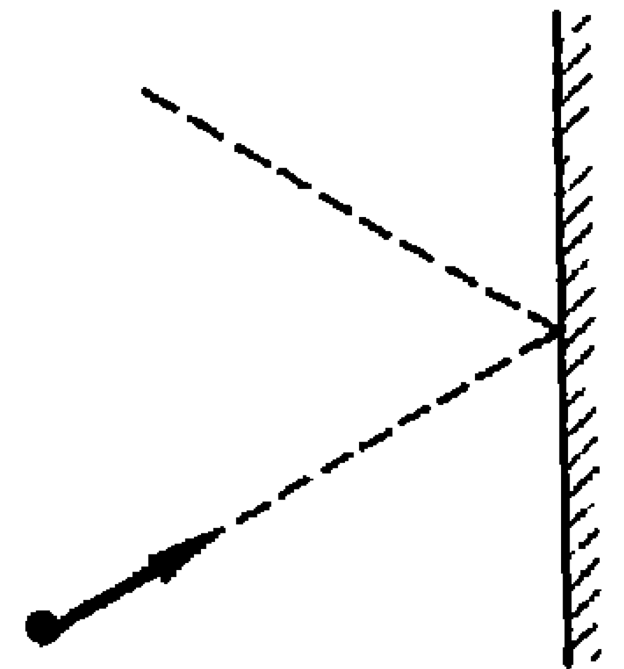
$$Ft = mv - mv_0$$

بوضع $t = 1$ s ستكون m هى كتلة الغاز المطرود فى الثانية (1300 kg) ، $v = 50,000$ m/s و $v_0 = 0$. وبالتعويض عن هذه الكميات فى المعادلة السابقة سنجد أن $F = 65,000,000$ N ، أو حوالى 15 مليون باوند . وهذه هى قوة الفعل اللازم لطرد الغازات الساخنة ، وينشأ الدفع على الصاروخ نتيجة لقوة رد الفعل المساوية فى المقدار والمضادة فى الإتجاه .

٦ – ٦ ضغط الغاز المثالى

فى هذا الجزء سوف تحسب الضغط على جدران وعاء نتيجة لتصادم جزيئات الغاز بهذه الجدران . والصورة فى منتهى البساطة من الناحية الكيفية . فاذا نظرنا الى الشكل ٦ – ٨ سنلاحظ أن جزىء الغاز المبين يسقط على جدار الوعاء ثم يرتد عنه متبعا

شكل (٦ – ٨)
يسبب العدد الضخم من جزيئات الغاز المتصادمة مع الجدار بالطريقة المبينة ظهور ضغط الغاز المشاهد .



المسار المنقط . وبالطبع فإنه يؤثر على الجدار بقوة معينة أثناء زمن التصادم ، وتكون قوة رد فعل الجدار المساوية فى المقدار والمضادة فى الاتجاه هى المسئولة عن التغير فى كمية تحركه .

ونظرا لوجود ذلك العدد الضخم من الجزيئات فى الغاز عند الضغوط المعقولة فإن بلايين التصادمات بالجدار ستحدث فى زمن قدره ثانية واحدة أو أقل . ولهذا فإن القوة الناتجة عن هذه التصادمات ستبدو ثابتة تقريبا . بالإضافة الى ذلك فإن متوسط القوة المؤثرة على الجدار ستكون عمودية عليه . وتعرف القوة العمودية المؤثرة على وحدة المساحات ، أى المتر المربع الواحد أو البوصة المربعة الواحدة .. الخ ، من الجدار **بضغط** الغاز . وبالرموز ، يعرف الضغط P بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{F}{A} \qquad (٦ - ٤)$$

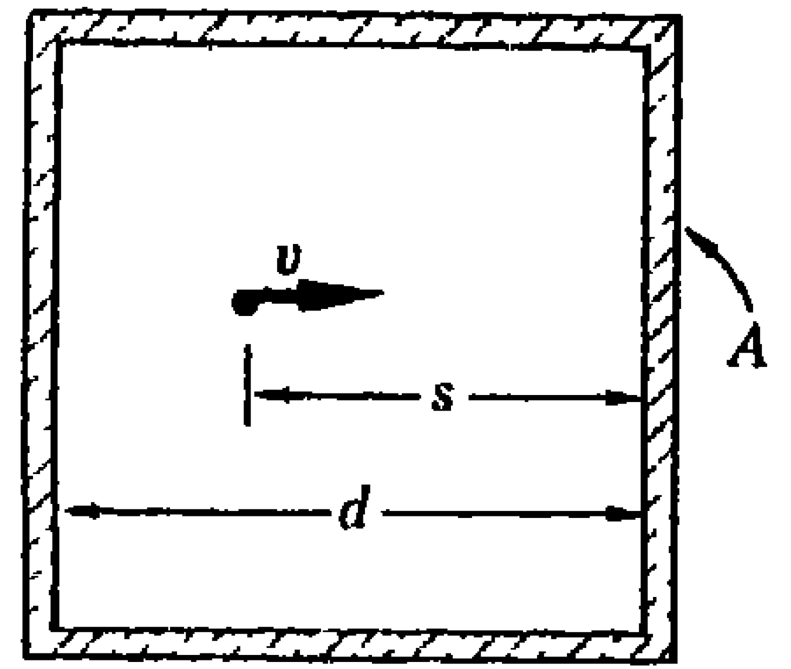
حيث F هى القوة المؤثرة عموديا على المساحة A . ووحدات الضغط هى النيوتن لكل متر مربع أو الباوند لكل بوصة مربعة .. الخ .

تعتبر عملية الحساب المضبوط لضغط الغاز على جدار الوعاء عملية معقدة للغاية فى حالة أى غاز حقيقى . ومع ذلك فقد ثبت فى النهاية أنه حتى النماذج المبسطة جدا للموقف الفيزيائى الحقيقى تعطى الإجابة الصحيحة تقريبا لمعظم الغازات الحقيقية . ومن المعتاد فى علم الفيزياء اجراء الحسابات المبسطة للموقف الفيزيائى أولا . وبازدياد فهم العلماء للعمليات الفيزيائية يمكنهم تنقيح حساباتهم باستخدام الصور أو النماذج الأكثر واقعية . وفى بعض الأحيان قد تمر سنين كثيرة قبل أن ينجح العلماء فى تعديل النموذج الأصلى غير الواقعى ليطابق العملية الحقيقية كما تثبتها التجربة بدقة أكثر . وينشأ هذا التأخير عادة نتيجة لعجز العلماء عن ابتكار نموذج أكثر واقعية قابل للتحليل الرياضى . بالإضافة الى ذلك فإن الموقف الفيزيائى الحقيقى يكون غامضا فى أحيان كثيرة ، وعندئذ ، يجب على العلماء أولا تصور نموذج للعملية الفيزيائية يمكنه أن يحقق الحقائق المشاهدة عمليا .

فى الحالة الحالية – حالة ضغط الغازات العادية – تؤدى النماذج البسيطة وحتى غير الواقعية لهذا الموقف الفيزيائى الى نتائج أساسية صحيحة أى نتائج تتفق مع التجربة . وسنقوم الآن بإيجاد ضغط الغاز المثالى باستخدام نموذج بسيط جدا (غير واقعى) ، ومع ذلك فإن نتيجتنا ستكون صحيحة فى جميع أساسياتها .

لنفرض أولا أن لدينا غازا فى وعاء وأن n_0 عدد الجزيئات فى وحدة الحجوم . لنفرض كذلك أن ثلث عدد الجزيئات يتحرك فى كل من الاتجاهات x ، y ، z ، وسنعتبر أنها جميعا تتحرك بنفس السرعة v . فإذا تأملنا ذلك الثلث من عدد الجزيئات الذى يتحرك فى الاتجاه x فإننا سنجد أن نصفه سيكون متحركا فى الاتجاه

$+x$ بينما يكون النصف الآخر متحركا فى الاتجاه $-x$. وهكذا فإن سدس عدد الجزيئات سيكون متحركا فى الاتجاه $+x$ وستكون سرعة كل منها v . لنفرض أيضا أن الجزيئات لايتصادم كل منها مع الآخر .



شكل (٦ - ٩)
يفترض أن سدس عدد الجزيئات فى الصندوق تتحرك فى الاتجاه المبين ، وسوف تصطدم هذه الجزيئات بالجدار خلال الزمن d/v . ونحن نفترض هنا أن عدد الجزيئات فى وحدة الحجوم هو ν_0 وتقرأ « نيوصفر » .

تأمل الموقف المبين بالشكل ٦ - ٩ الذى يمثل جسيما يسير فى الاتجاه $+x$ نحو جدار مساحته A . الزمن اللازم لكى يصل هذا الجسيم الى الجدار الذى يبعد عنه مسافة قدرها s ثم يصطدم به هو s/v . وكما هو واضح من الشكل فإن عرض الصندوق هو d . لذلك فإن جميع الجزيئات الموجودة بالصندوق والمتحركة فى الاتجاه $+x$ سوف تصطدم بالمساحة A فى خلال زمن قدره $t = d/v$. وحيث أن حجم الصندوق ، وبالتالى حجم الغاز هو Ad . وكذلك حيث أن عددا من الجزيئات قدره $\frac{1}{6}\nu_0$ لوحدة الحجوم يتحرك فى الاتجاه $+x$ ، فإن العدد الكلى للجزيئات المتحركة فى الاتجاه $+x$ سيكون $(\frac{1}{6})(\nu_0)(Ad)$ ، وسوف تصطدم جميع هذه الجزيئات بالجدار الأيمن للصندوق فى خلال الزمن d/v .

فإذا فرضنا أن تصادم الجزيئات بالجدار مرن تماما فإن سرعة أى جزىء سوف تنعكس تماما عند اصطدامه بالجدار . بناء على ذلك يمكننا كتابة العلاقة التالية لكل جزىء يصطدم بالجدار .

$$2mv = \text{التغير فى كمية الحركة}$$

حيث m كتلة الجزىء . أى أن كمية تحرك الجزىء تتغير بمقدار mv عندما يوقفه الجدار كما أن الجزىء يكتسب كمية تحرك اضافية معاكسة قدرها mv ، وبذلك فإن التغير الكلى فى كمية التحرك ستكون $2mv$.

وحيث أن عدد الجزيئات التى تصطدم بالجدار فى زمن قدره $t = d/v$ هو $(\frac{1}{6})(\nu_0)(Ad)$ ، فإن التعير الكلى فى كمية التحرك الذى يسببه الجدار فى ذلك الزمن هو :

$$(2mv)(\tfrac{1}{6})(\nu_0)(Ad)$$

ولكننا نعلم أن الرفع Ft على الجدار يساوى التغير فى كمية التحرك ، حيث F متوسط القوة التى تؤثر بها الجزيئات على الجدار .*

* لاحظ أن t هنا ليس زمن التصادم للجزىء الواحد ، ولكنه زمن تصادم عدد كبير من الجزيئات بالحائط وهو فى حالتنا هذه يساوى d/v .

وباستخدام حقيقة أن $t = d/v$ نجد أن :

$$F\frac{d}{v} = (2mv)(\tfrac{1}{6})(\nu_0)(Ad)$$

وبعد تبسيط هذه العلاقة سنحصل على المعادلة التالية لمتوسط الضغط على الجدار :

$$P = \frac{F}{A} = (\tfrac{1}{3})(\nu_0)(mv^2) \qquad (٦ - ٥)$$

وبدلالة كمية تحرك الجزىء تكتب المعادلة السابقة على الصورة :

$$P = (\tfrac{2}{3})(\nu_0)(\tfrac{1}{2}mv^2) \qquad (٦ - ٦)$$

يتناسب الضغط مع طاقة حركة الجزىء

لاحظ أن ضغط الغاز يساوى ثلثى طاقة الحركة لوحدة الحجوم لأن ν_0 هو عدد الجزيئات فى وحدة الحجوم . وسوف نرى فى فصل لاحق أن ضغط الغاز يمكن أن يستخدم أيضا كمقياس لدرجة حرارة الغاز . وعليه فيبدو أننا سوف نجد أن درجة الحرارة وطاقة الحركة ترتبطان مع بعضهما ارتباطا وثيقا . وفى الحقيقة فإننا سنعرف أن الجسم الساخن هو ذلك الجسم الذى تمتلك جزيئاته كمية كبيرة من طاقة الحركة .

وبالرغم من أن المعادلة (٦ - ٦) قد اشتقت باستخدام نموذج مفرط فى التبسيط فإن النتيجة عامة . فطالما كان الغاز بعيدا عن الشروط التى تؤدى الى اسالته فإن المعادلة (٦ - ٦) تظل صحيحة كتقريب جيد . وحيث أن الغاز يتبع تماما هذه المعادلة هو غاز مثالى ، فإن المعادلة (٦ - ٦) هى احدى صور **قانون الغاز المثالى** . ومن المثير أن تؤدى الطريقة البسيطة التى استخدمناها فى الحساب (والتى استخدمها الباحثون الأوائل فى علم الفيزياء) الى نتيجة تتفق اتفاقا جيدا مع التجربة . فبالإضافة الى زيف فروض تساوى سرعة الجزيئات وتعامد حركتها والتصادم المرن للجزيئات مع الجدار فإن فرض أن الجزيئات لايتصادم كل منها مع الآخرين بعيد جدا عن الحقيقة . ففى الهواء عند الضغوط العادية يتصادم الجزىء مع الآخر بعد أن يسير مسافة تساوى حوالى $10^{-5}\ cm$.

مثال توضيحى ٦ - ٩ : اوجد متوسط سرعة جزيئات النيتروجين عند الظروف العيارية علما بأن الضغط الجوى العيارى هو $1.01 \times 10^5\ N/m^2$ وعدد جزيئات لنيتروجين فى حجم قدره $1\ m^3$ عند الضغط ودرجة الحرارة $(0°C)$ العياريين هو 2.7×10^{25} وكتلة الجزىء الواحد من النيتروجين هى $4.7 \times 10^{-26}\ kg$.

طريقة الحل : يمكننا استخدام المعادلة (٦ - ٦) لحل هذه المسألة كذلك فإننا نعلم من المعطيات أن $\nu_0 = 2.7 \times 10^{25}\ m^{-3}$ *، $m = 4.7 \times 10^{-26}\ kg$ ،

* من المعتاد اختصار العبارة « فى المتر المكعب » بكتابتها هكذا m^{-3} ، وعليه فإننا نكتب عدد الجزيئات فى المتر المكعب على الصورة $2.7 \times 10^{25}\ m^{-3}$.

$P = 1 \times 10^5\ N/m^2$ وهى جميعا مقاسة فى نظام الوحدات SI . وعليه ، باستخدام المعادلة (٦ – ٦) نجد أن :

$$1 \times 10^5\ N/m^2 = \tfrac{1}{3}(2.7 \times 10^{25}\ m^{-3})(4.7 \times 10^{-26}\ kg)v^2$$

وحيث أن النيوتن هو $1\ kg.\ m/s^2$ ، يمكننا أن نجد من المعادلة السابقة أن :

$$v \approx 490\ m/s$$

مثال توضيحى ٦ – ١٠ : تطير الطائرات النفاثة التجارية عادةعلى ارتفاعات تزيد عن 7000 m . ويكون الضغط عند هذا الارتفاع حوالى نصف قيمته عند مستوى سطح البحر . لذلك فإن جميع الطائرات تقريبا مكيفة الضغط لتعويض ذلك . ماذا يحدث لشاغلى الطائرة عند هذا الارتفاع إذا كان الضغط فى المقصورة مساويا لضغط الجو خارج الطائرة ؟

طريقة الحل : نعلم من المعادلة (٦ – ٦) أن $P \sim \nu_0$ ، حيث ν_0 عدد الجزيئات فى وحدة الحجوم . وعند الارتفاع 7000 m يكون الضغط (وكذلك ν_0) مساويا فقط لنصف قيمته عند مستوى سطح البحر . بناء على ذلك فإن كمية جزيئات الأكسجين التى تدخل الرئتين فى كل مرة يتنفس فيها الشخص تقل إلى حوالى النصف بالمقارنة بالكمية التى يحصل عليها عند مستوى سطح البحر ، أى أن كمية الأكسجين التى يزود بها الجسم تقل الى النصف . ولتعويض ذلك النقص يتحتم على الشخص أن يتنفس بمعدل أسر ع كثيرا من المعتاد ، وعادة مايكون ذلك متعباً جدا فى حد ذاته . أما اذا لم يفعل الشخص ذلك فإن حيوية جسمه ستقل بدرجة كبيرة . وكثيرا مايلاحظ زوار المناطق الجبلية هذه الظاهرة . أما أبناء هذه المناطق المرتفعة فإن أجسامهم قد تكيفت لمواجهة هذه الظروف بزيادة عدد خلايا الدم الحمراء مثلا ، مما يسمح لها بأن تعمل بطريقة أفضل مع وجود نقص فى الأكسيجين .

ملخص

كمية التحرك الخطى لجسم كتلته m وسرعته $\mathbf{v}$ هى $m\mathbf{v}$. كمية التحرك الخطى هى كمية موجهة ويرمز لها عادة بالرمز $\mathbf{P}$.

اذا وقع جسم تحت تأثير قوة $\mathbf{F}$ لزمن قدره t فإن الدفع المؤثر على الجسم هو $\mathbf{F}t$. يسبب الدفع تغيرا فى كمية تحرك الجسم . الدفع يساوى التغير فى كمية التحرك ، أى أن : $\mathbf{F}t = m\mathbf{v} - m_0\mathbf{v}_0$. وهذه هى صورة أخرى لقانون نيوتن الثانى للحركة .

مجموعة الأجسام التى لاتؤثر عليها أية قوة محصلة خارجية يمكن اعتبارها معزولة طالما كنا نهتم بالحركة الانتقالية . فى حالة النظام المعزول تكون كمية تحرك الأجسام المكونة له ثابتة ، وهذا هو قانون بقاء كمية التحرك الخطى . هذا القانون هام جدا فى تحليل تصادم الأجسام . طاقة الحركة محفوظة فى حالة التصادم المرن تماما . فى كثير من الأحيان تفقد كمية كبيرة من طاقة الحركة أثناء التصادم متحولة الى طاقة حرارية أو صور أخرى من الطاقة .

اذا أثرت قوة قدرها F عموديا على سطح مساحته A فإن مقدار الضغط على هذا السطح نتيجة لتلك القوة هو $P = F/A$. يمارس الغاز الموجود فى وعاء ضغطا على الجدران نتيجة لتصادم جزيئات الغاز بالجدران . ضغط الغاز المثالى الذى يحتوى على عدد من الجزيئات مقداره ν_0 فى وحدة الحجوم هو $P = (\frac{2}{3})(\nu_0) \quad (\frac{1}{2}mv^2)$. فى هذه العلاقة v هو متوسط السرعة اللاتجاهية لجزىء كتلته m .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – تعريف كمية التحرك الخطى وحسابه لجسم بمعلومية المعطيات الكافية . إعطاء أمثلة تبين كيف تعتمد كمية التحرك على السرعة أو الكتلة أو كليهما .

٢ – ايجاد التغير فى كمية تحرك جسم يقع تحت تأثير متوسط قوة معينة لزمن معلوم . تعريف الدفع وايجاد العلاقة بينه وبين كمية التحرك الخطى. حساب الدفع اللازم لإحداث تغير معين فى كمية التحرك .

٣ – ذكر قانون بقاء كمية التحرك مع الاهتمام بتوضيح أهمية الكلمات « نظام معزول » . اشرح لماذا وتحت أى ظروف يكون هذا القانون نافعا حتى اذا لم يكن النظام معزولا تماما .

٤ – تحليل تصادم جسمين يلتصقان معا عند التصادم ، أى المواقف المشابهة لتلك المبينة فى المثال التوضيحى ٦ – ٣ .

٥ – تحليل المواقف التى ينفجر فيها جسم موجود أصلا فى حالة السكون الى قطعتين أو يرتد ، أى المواقف الشبيهة بالمثال التوضيحى ٦ – ٤ .

٦ – تحليل المواقف التى يتحرك فيها جسمان فى خط مستقيم واحد ويتصادمان تصادما مرنا تماما ثم يستمران فى الحركة فى نفس الخط المستقيم .

٧ – شرح الفرق بين التصادم المرن وغير المرن . اشرح باسلوبك الخاص كيف تتصرف الكرة المرتدة فى هذه الحالة . ذكر الأسباب المعقولة لحقيقة أن طاقة الحركة ليست محفوظة فى معظم التصادمات .

٨ – شرح المواقف التى يصطدم فيها الجسم المتحرك بآخر ثابت ثم يطمر فيه وكيف أن طاقة الحركة المتبقية تتحول الى طاقة وضع أو تفقد فى بذل شغل الاحتكاك . يمكن أن يؤخذ البندول القذفى كموقف نموذجى .

٩ – شرح مبدأ عمل الصواريخ والمحركات النفاثة والأجهزة المشابهة التى تدفع باستخدام المنفث .

١٠ – تعريف الضغط وشرح لماذا يمارس الغاز الموجود فى وعاء ضغطا على جدران الوعاء . وضح باسلوبك الخاص لماذا يجب أن يعتمد الضغط على v ، m ، ν_0 .

١١ – القدرة على حل المسائل البسيطة المشابهة للمثال التوضيحى ٦ – ٩ بمعلومية العلاقة بين P ، ν_0 ، v ، m .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

كمية التحرك الخطى : $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$

الدفع : $\mathbf{F}t = m\mathbf{v} - m_0\mathbf{v}_0$

النظام المعزول

بقاء كمية التحرك الخطى

التصادم المرن وغير المرن

الارتداد

بندول بالستى (ballistic) – بندول قذفى

ـدفع النفثى

الضغط $P = F/A$

غاز مثالى

قانون الغاز المثالى $P = (\frac{2}{3})(\nu_0)(\frac{1}{2}mv^2)$

اسئلة وتخمينات :

١ – اشرح باستخدام معادلة الدفع لماذا لايكون من الحكمة أن تحتفظ برجليك مستقيمتين صلبتين عندما تقفز من فوق حائط أو منضدة الى الأرض . ماهى العلاقة بين هذا وبين الاعتقاد السائد بأن احتمال اصابة الشخص الثمل عند السقوط أقل من احتمال اصابة الشخص غير الثمل ؟

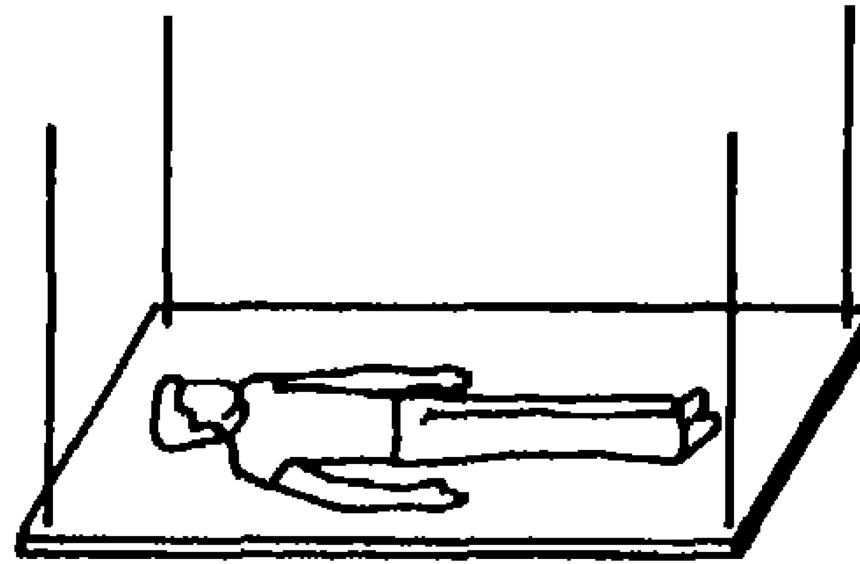
٢ – اشرح مبدأ عمل مصادمات السيارة الماصة للصدمات وأجهزة امتصاص الصدمات المشابهة باستخدام معادلة الدفع .

٣ – عند اطلاق مدفع كبير فإنه يرتد مسافة معينة ضد جهاز تخميد الصدمة . لماذا يكون من الضرورى تصميم حامل المدفع بحيث « يعمل » بهذه الطريقة ؟

٤ – عند إسقاط كرة على أرضية صلدة فإن كمية تحركها تكون متجهة الى أسفل ، وبعد الارتداد تصبح كمية تحركها متجهة الى أعلى . من الواضح أن كمية تحرك الكرة ليست محفوظة عند التصادم بالرغم من أن الكرة قد ترتد الى نفس الارتفاع الذى اسقطت منه . هل يتعارض هذا مع قانون بقاء كمية التحرك ؟

٥ – اخترع جهازا يمكن أن يكون له ، على الأقل لحظيا ، طاقة حركة ولاتكون له كمية تحرك . هل من الممكن تصميم جهاز له كمية تحرك وليست له طاقة حركة ؟ اشرح .

٦ – عندما يحرر بالون أطفال مملوء بالهواء ليسمح للهواء بالخروج فإن البالون ينطلق فى الهواء . اشرح لماذ يتحرك البالون بهذه الطريقة.ماهو وجه التشابه بين الصاروخ والبالون ؟



شكل (م ٦ – ١)

٧ – عندما ينبض قلبك فإنه يسبب تدفق الدم فى جسمك . ويمكن مراقبة هذه الحركة بوضع الشخص على لوح معلق فى أسلاك كما هو مبين فى شكل م٦ – ١ . عندئذ يتحرك اللوح حركات صغيرة تعكس عملية القلب ، وتسجل حركات اللوح باستخدام أجهزة حساسة للحصول على معلومات عن عمل القلب ويسمى هذا الجهاز **رسم القلب القذفى**) . اشرح لماذا تعطى حركة اللوح معلومات عن عمل القلب .

٨ – يصاب لاعب البيسبول بالكابوس التالى . حبس اللاعب مصادفة فى شاحنة سكة حديد صندوقية . ولحسن الحظ كان هذا اللاعب يصطحب معه كرته ومضربه . ولكى يبدأ اللاعب حركة العربة فإنه يقف فى احدى نهايتيها ويضرب الكرة فى اتجاه النهاية الأخرى عندئذ يسبب الدفع الذى يؤثر به الكرة عند اصطدامها بنهاية العربة حركتها الى الامام . وحيث أن الكرة ترتد دائما وتتدحرج على الأرضية نحو اللاعب فإنه يكرر هذه العملية مرات ومرات . وفى نهاية الأمر تكتسب العربة سرعة عالية . ويقتل اللاعب عند اصطدام الشاحنة الصندوقية بأخرى ساكنة موجودة على نفس خط السكة الحديد . حلل هذا الحلم من وجهة النظر الفيزيائية المناسبة .

٩ – اشرح كيف تقفز الفولة المكسيكية القفازة بدون تدخل خارجى .

١٠ – ذبابة محبوسة فى داخل وعاء خفيف الوزن مغلق تماما . هل تستطيع أن تعرف ماإذا كانت الذبابة ساكنة أو طائرة بوزن الوعاء ؟ اشرح .

١١ – قفز رجل وزنه 200 lb من فوق سطح منزل ارتفاعه 30 ft عن سطح الأرض . ماهى القوة بالتقريب التى يجب أن تتحملها ساقاه عندما يصل الى الأرض ؟ (ق)

١٢ – سقط طفل كتلته 10 kg من نافذة والتقفتة سيدة موجودة على بعد 15 m أسفل النافذة . قدر القوة التى يتعرض لها الطفل عند التقافه . (ق)

١٣ – ماهى القوة التى تؤثر بها قطرة مطر متوسطة الحجم على رأس رجل اصلع ؟ (ق)

١٤ – يندفع عمود افقى من الماء من خرطوم الى نافذة بسرعة قدرها 5 m/s ومعدل قدره 30 g/s . ماهى القوة بالتقريب التى يؤثر بها عمود الماء على النافذة ؟ (ق)

١٥ – يهب الريح على لافتة بسرعة قدرها 30 m/s . فإذا كانت كتلة $1\ m^3$ من الهواء (أى الكثافة) هى $1.29\ kg/m^3$، قدر القوة التى يؤثر بها الريح على وحدة المساحات من اللافتة . (ق)

١٦ – قدر القوة التى يؤثر بها رأس سيدة على رقبتها إذا اصطدمت شاحنة محملة تسير بسرعة قدرها 20 mi/h (9 m/s) سيارتها الساكنة من الخلف . لماذا يؤدى مثل هذا النوع من الحوادث عادة الى مايسمى اصابة ضربة السوط ؟ ستحتاج عندئذ الى تقدير ك رأس السيدة والزمن اللازم لتسارع . (ق)

١٧ – لنفرض أنك وضعت يدك منبسطة على منضدة ثم اسقطت عليها كتلة معملية مسطحة قدرها 1.0 kg من ارتفاع قدره 0.5 m . قدر متوسط القوة التى تؤثر بها الكتلة على يدك . (ق) لماذا يكون احتمال الإصابة كبيرا فى هذه الحالة بالرغم من أنك تستطيع التقاط الكتلة بسهولة عند اسقاطها من هذا الارتفاع ؟

مسائل :

١ – اسقطت كتلة مقدارها m من ارتفاع قدره h. ماهى كمية تحركها قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟ إهمل تأثيرات الاحتكاك .

٢ – اثبت أن العلاقة بين كمية التحرك الخطى p وطاقة الحركة KE لكتلة قدرها m هى $KE = p^2/2m$.

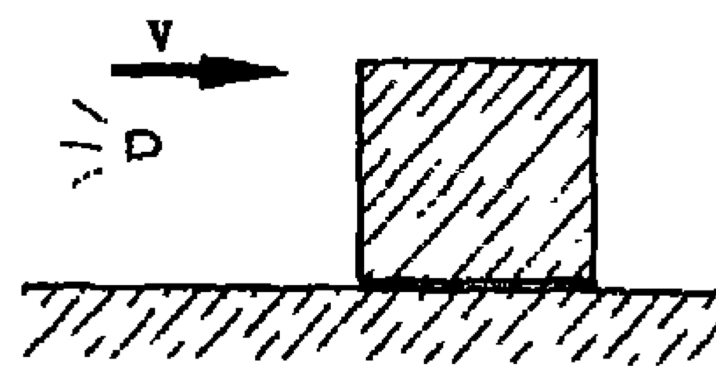
٣ – باستخدام معادلة الدفع . (أ) اوجد متوسط القوة اللازمة لإيقاف سيارة وزنها 3200 lb فى زمن قدره 5.0 s اذا كانت السرعة الابتدائية للسيارة 80 ft/s . (ب) بفرض أن التسارع منتظم ، ماهى المسافة التى تقطعها السيارة فى هذا الزمن ؟

٤ – اصطدمت سيارة كتلتها 1500 kg تتحرك بسرعة قدرها 20 m/s بحائط فتوقفت بعد مسافة قدرها 3.0 m . بفرض أن التقاصر منتظم ، ماهو الزمن اللازم لتوقف السيارة ؟ استخدم معادلة الدفع لإيجاد قوة الايقاف التى تؤثر عليها .

٥ – اصطدمت كرة كتلتها 120 g متحركة بسرعة قدرها 18 m/s بحائط عموديا وارتدت فى خط مستقيم الى الخلف . وبعد أن تلامست الكرة بالحائط تحرك مركزها مسافة اضافية قدرها 0.27 cm نحو الحائط . بفرض أن التقاصر الذى يسببه الحائط منتظم ، اثبت أن زمن التلامس مع الحائط هو 2×0.00030 s ماهو متوسط القوة التى تؤثر بها الكرة على الحائط ؟

٦ – تصادمت كرتان متماثلتان وكانت الكرة الأولى متحركة الى اليمين بسرعة قدرها 10 m/s بينما الكرة الثانية ساكنة . اوجد اتجاه ومقدار سرعة الكرتين اذا التصقا سويا بعد التصادم .

٧ – يمثل الشكل م ٦ – ٢ رصاصة كتلتها 20 g تتحرك بسرعة قدرها 5000 cm/s ثم تصطدم بقالب كتلته 7000 g مستقر فى حالة السكون على منضدة . أوجد (أ) سرعة القالب بعد التصادم ، (ب) قوة الإحتكاك بين المنضدة والقالب إذا تحرك الجسم 1.5 cm قبل التوقف .



شكل (م ٦ – ٢)

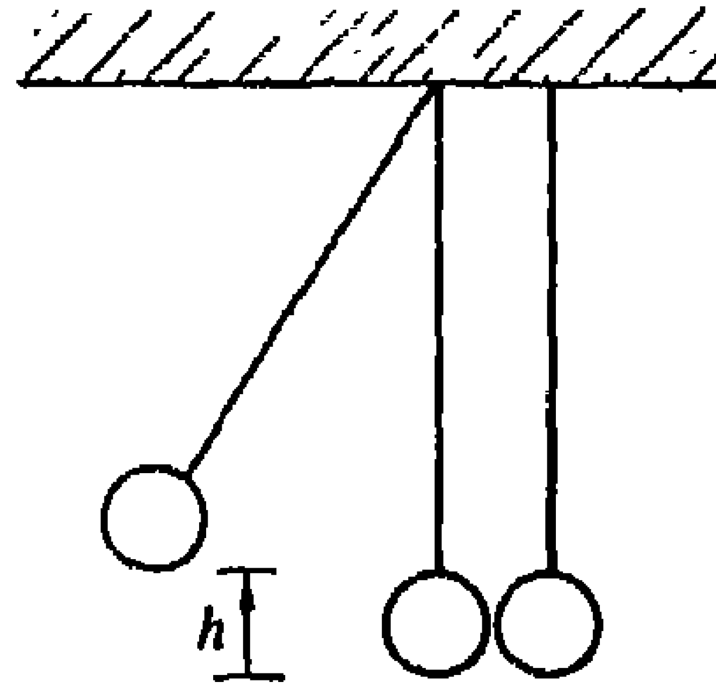
٨* – فى الشكل م ٦ – ٢ تلزم قوة أفقية قدرها 0.70 N لجذب قالب كتلته 5000 g على المنضدة بسرعة ثابتة . اوجد سرعة الرصاصة التى كتلتها 20 g والمبينة بالشكل اذا طمرت الرصاصة فى القالب وسببت انزلاقه مسافة قدرها 1.5 m قبل أن تصل الى السكون .

٩ – وضع قالب كتلته 2.0 kg على فتحة صغيرة فى منضدة ، ثم اطلق رجل رصاصة كتلتها 15.0 g من أسفل المنضدة على القالب خلال الفتحة التى يستقر عليها . ماهى سرعة الرصاصة اذا ارتفع القالب مسافة قدرها 1.30 m فوق المنضدة ؟

١٠ – انفصلت رائدة فضاء كتلتها 60 kg فى الفضاء عن سفينتها الفضائية وكانت تبعد مسافة قدرها 15.0 m عن السفينة وساكنة بالنسبة اليها . وفى محاولة للرجوع قذفت الرائدة مفتاح ربط كتلته 500 g بسرعة قدرها 8.0 m/s فى الاتجاه البعيد عن السفينة . ماهو الزمن اللازم لرجوع رائدة الفضاء الى السفينة .

١١ – تتزن بطيخة كتلتها 2.0 kg على رأس رجل أصلع . وأطلقت زوجته سهما كتلته 50 g على البطيخة بسرعة قدرها 30 m/s فنفذ السهم خلالها وخرج بسرعة قدرها 18 m/s . أوجد سرعة البطيخة عندما تطير من فوق رأس الرجل .

١٢ – ارجع الى الشكل م ٦ – ٢ . جذب البندول الأيسر جانبا الى الموضع المبين ثم أعتق وسمح له بالتصادم مع البندول الآخر الذى كان ساكنا عند ذلك . (أ) ماهى سرعة الكرة اليسرى قبل التصادم مباشرة ؟ (ب) واذا التصقت الكرتان بعد التصادم ، فما هو الإرتفاع الذى تصل اليه المجموعة بدلالة h ؟ إفترض أن الكرتين متساويتى الكتلة .



شكل (م ٦ – ٣)

١٣ – تنتج المفاعلات النووية كثيرا من النيوترونات السريعة . ولإبطاء هذه النيوترونات يسمح لها بالتصادم مع جسيمات ذات كتلة قريبة من كتلة النيوترونات . لنفرض أن نيوترونا سرعته v يصطدم تصادما مباشرا مع بروتون ساكن . ماهى سرعة النيوترون بعد التصادم اذا كان التصادم مرن تماما علما بأن كتلتى النيوترون والبروتون متساويتان تقريبا ؟

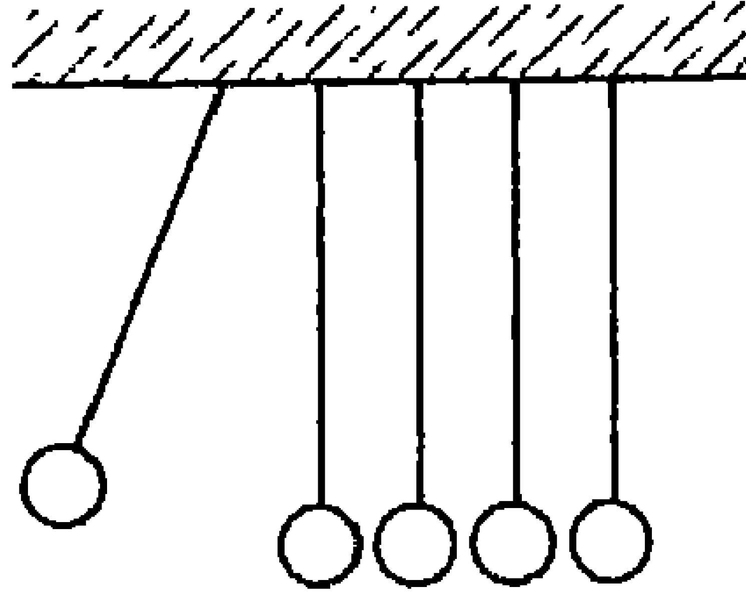
١٤ – الكتلتان المبينتان فى شكل م ٦ – ٣ متماثلتان . ازيحت الكتلة اليسرى كما هو مبين بالشكل ثم اعتقت فاصطدمت بالكتلة الأخرى تصادما مرنا تماما . (أ) الى أى ارتفاع (بدلالة h) تصل الكتلة بعد التصادم ؟ (ب) والى أى ارتفاع تصل الكتلة اليسرى ؟

١٥ – فى الشكل م ٦ – ٣ ازيحت الكتلتان الى ارتفاع قدره h ، بحيث كانت ازاحة احداهما الى اليسار كما هو مبين ، بينما كانت ازاحة الأخرى الى اليمين . ثم حررت الكتلتان فى نفس اللحظة فتصادمتا تصادما مرنا تماما عند القاع . الى أى ارتفاع تصل كل من الكتلتين بعد التصادم ؟ افترض أن الكتلتين متماثلتين .

١٦* – كما هو موضح فى الشكل م ٦ – ٣ جذبت الكتلة اليسرى جانبا ثم اعتقت ، وكانت سرعتها عند القاع v_0 . عندئذ تصادمت هذه الكتلة مع الكتلة اليمنى تصادما مرنا تماما . أوجد سرعة كل من الكتلتين بعد التصادم مباشرة اذا كانت الكتلة اليسرى ثلاثة أضعاف الكتلة اليمنى .

١٧** – كرر المسألة ١٦ اذا كانت الكتلة اليسرى ثلث الكتلة اليمنى .

١٨** – يتصادم الكترون ($m = 9 \times 10^{-31}$ kg) متحرك بسرعة قدرها 2.0×10^{7} m/s تصادما مباشرا مع ذرة ايدروجين $m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg سرعتها الابتدائية تساوى صفرا . أوجد السرعة النهائية لذرة الايدروجين بفرض أن التصادم مرن تماما وأن الحركة على نفس الخط المستقيم .

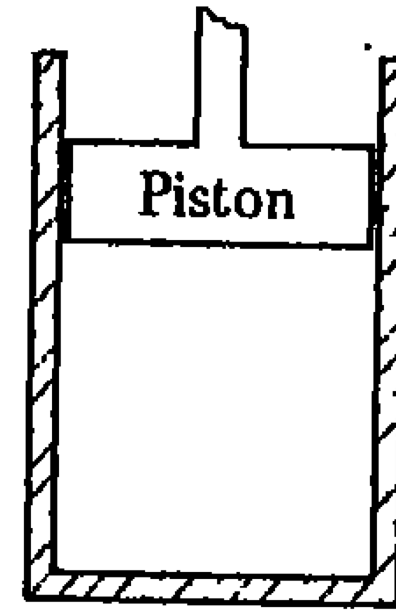


شكل (م ٦ - ٤)

١٩ - يباع الجهاز المبين بالشكل م ٦ - ٤ كبدعة جديدة، وجميع كتلة متساوية . عندما تزاح احدى الكتل جانبا كما هو مبين ثم تعتق فإن الكتلة المقابلة تطير الى الخارج بينما تحتفظ جميع الكتل الأخرى بوضعها . (أ) إثبت أن هذه النتيجة متوقعة اذا كانت التصادمات مرنة تماما ؟ ماذا يحدث إذا ازيحت كتلتان جانبا ثم اعتقتا بدلا من واحدة ؟

٢٠ - إفترض أن نصف عدد جزيئات غاز قد أزيلت من الوعاء دون تغيير متوسط طاقة حركة الجزىء فى داخل الوعاء . بأى نسبة يتغير ضغط الغاز ؟

٢١ - تحتوى غرفة بكباس على عدد من الجزيئات عند الضغط الجوى كما هو مبين بالشكل م ٦ - ٥ فاذا دفع الكباس الى أسفل بحيث لاتتغير طاقة حركة الجزيئات تغيرا محسوسا ، فما هو الضغط فى الوعاء عندما يضبح الحجم مساويا للحجم الأصلى ؟



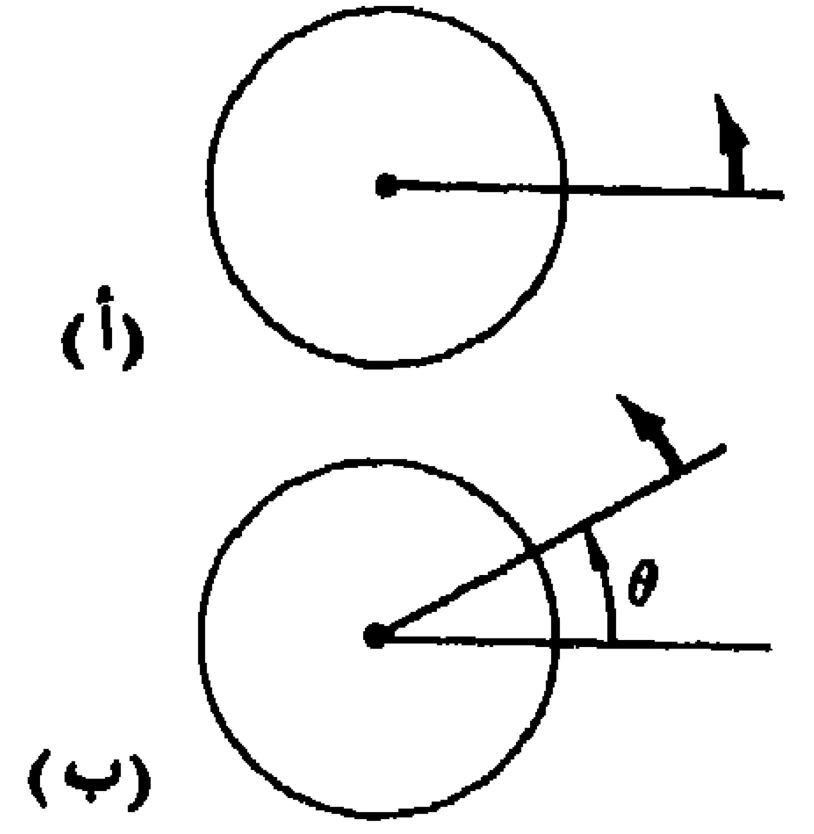
(١) شكل (م ٦ - ٥)

الفصل السابع

الحركة الزاوية
والقوة الجاذبة المركزية

فى هذا الفصل سنوسع دراستنا للحركة لكى تشمل الأجسام التى تتحرك فى مسارات دائرية . وكثيرا ما نقابل هذا النوع من الحركة فى الطبيعة ، لذلك فإن معرفتها ضرورية لفهم تلك الموضوعات المتنوعة كحركة الأجسام فى النظام الشمسى وتركيب الذرات . وسوف نطبق مبادىء الحركة الدائرية على مختلف المسائل الفيزيائية وكذلك سوف نناقش موضوع انعدام الوزن .

٧ - ١ المسافة الزاوية(أو البعد الزاوى) θ



شكل (٧ - ١)
تصف الزاوية θ المسافة الزاويةالتى لفتها العجلة .

ناقشنا حتى هذا الفصل الحركة فى خط مستقيم فقط . ومع ذلك فان الحركة فى دائرة شائعة جدا وذات أهمية كبيرة . وفى هذا الفصل سوف ندرس هذا النوع من الحركة . لنفرض أن لدينا عجلة مثبتة فى محور يمر بمركزها كما هو مبين فى شكل ٧ - ١ عند الانتقال من شكل ٧ - ١ أ إلى ب تكون العجلة قد دارت زاوية قدرها θ . هناك ثلاث طرق مختلفة يمكن أن يقاس بها هذا الدوران .

الطريقة الأولى هى أن تقاس θ بالدرجات . فإذا دارت العجلة دائرة كاملة فإن θ تكون $360°$. وهذه الطريقة لقياس مقدار دوران العجلة معروفة لنا جيدا . كذلك فإن الطريقة الثانية لقياس θ شائعة أيضا فى الحياة اليومية . فعندما تدور العجلة دائرة كاملة يقال أن (دورة revolution) $\theta = 1$ rev من الواضح أن :

$$1 \text{ rev} = 360°$$

الطريقة الثالثة لقياس θ ذات أهمية خاصة فى العلم . وتعرف هذه الطريقة لقياس الزوايا ، والمسماة **بالمقياس النصف قطرى** ، بدلالة النسبة بين طولين . واذا رجعنا الى الشكل ٧ - ٢ فإننا سنرى أن النقطة A على العجلة قد تحركت على قوس طوله s عندما دارت العجلة زاوية θ . وإذا كان نصف قطر العجلة هو r يمكننا وضع التعريف التالى :

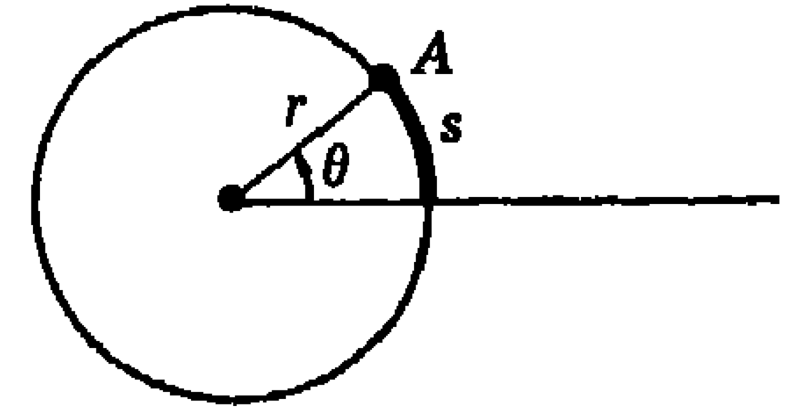
الزوايا بالمقياس النصف قطرى

$$\theta \text{ بالمقياس النصف قطرى} = \frac{\text{طول القوس}}{\text{نصف القطر}}$$

$$\theta = \frac{s}{r} \quad \text{radians} \qquad (٧ - ١)$$

لاحظ أن θ هى ببساطة نسبة ، وعليه فلا وحدات لها . وبالرغم من ذلك فإننا نقول مثلا أن « الزاوية هى π rad (radians) أو $180°$ أو $\frac{1}{2}$ rev » لتوضيح كيف تقاس الزوايا . وحيث أن $s = 2\pi r$ للفة الواحدة من العجلة ، فإننا نقول أن :

$$1 \text{ rev} = 360° = 2\pi \text{ rad}$$



شكل (٧ - ٢)
فى المقياس النصف قطرى $\theta = s/r$.

مثال توضيحى ٧ - ١ : لدينا زاوية معينة تساوى $70°$. اوجد مكافئها بالزوايا النصف قطرية والدورات .

طريقة الحل : تبين لنا العلاقات بين مختلف المقاييس الزاوية أن :

$$70 \text{ deg} = (70 \text{ deg})\left(\frac{2\pi \text{ rad}}{360 \text{ deg}}\right) = 1.22 \text{ rad}$$

و

$$70 \text{ deg} = (70 \text{ deg})\left(\frac{1 \text{ rev}}{360 \text{ deg}}\right) = 0.194 \text{ rev}$$

مثال توضيحى ٧ – ٢ : يمثل الشكل ٧ – ٣ خيطا ملفوفا حول عجلة نصف قطرها 20 cm . بأى زاوية يجب أن تلف العجلة لكى تفك 30 cm من الخيط ؟

طريقة الحل : عندما تفحص الشكل ٧ – ٣ يمكنك أن تقنع نفسك بصحة مايلى : عندما تدور نقطة على حافة العجلة على قوس طوله s فإن طول الخيط المفكوك سيكون أيضا s . كذلك فإن المعادلة (٧ – ١) تبين لنا أن :

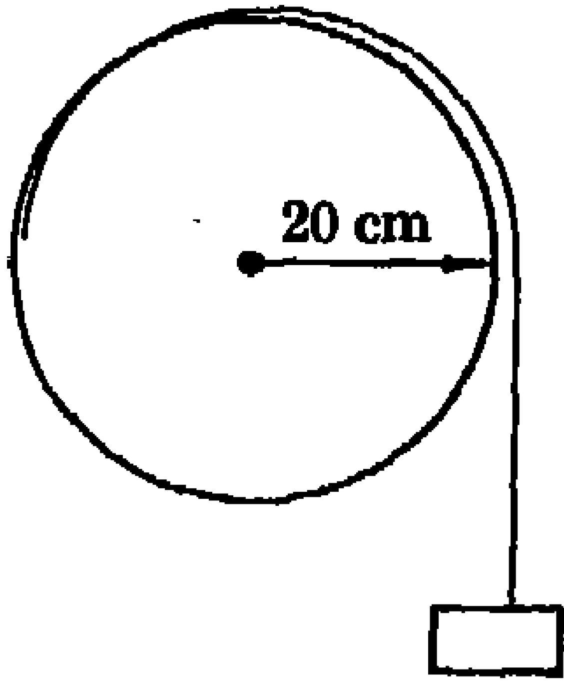
$$\theta \text{ in radians} = \frac{s}{r}$$

وفى هذه الحالة $s = 30$ cm ، $r = 20$ cm إذن :

$$\theta \text{ in radians} = \tfrac{30}{20} = 1.50 \text{ rad}$$

أو

$$\theta = (1.50 \text{ rad}) \left(\frac{360 \text{ deg}}{2\pi \text{ rad}}\right) = 86 \text{ deg}$$



شكل (٧ – ٣)
ماهو مقدار دوران العجلة اللازم لفك 30 cm من الخيط ؟

٧ – ٢ السرعة الزاوية

عندما نقول أن عجلة تدور بمعدل 800 rev/min فإننا نعطى سرعتها الزاوية ، وهذا يعنى أننا نذكر مقدار دورانها فى زمن معين . **ويعرف متوسط السرعة الزاوية** لعجلة دائرة بالزاوية التى تدورها العجلة مقسومة على الزمن اللازم لدورانها هذه الزاوية . ومعادلة متوسط السرعة الزاوية هى : تعريف

متوسط السرعة الزاوية

$$\bar{\omega} = \frac{\theta}{t} \qquad (٧ - ٢)$$

حيث θ هى الزاوية التى تدورها العجلة فى زمن t (ω هى الحرف اليونانى أو ميجا) وكما نرى فإن وحدات ω هى وحدات الزاوية مقسومة على وحدات الزمن . فمثلا يمكن أن تكون وحدات ω الدرجة فى الثانية أو الدورة فى الدقيقة أو الزاوية النصف قطرية فى الثانية .. الخ .

ويتشابه تعريف متوسط السرعة الزاوية كثيرا مع تعريفنا للسرعة فى حالة الحركة الخطية ، اذ أن $\bar{v} = s/t$ ، حيث s هى المسافة الخطية المقطوعة فى زمن t وسنرى فيما يلى أن لكل من معادلاتنا الخمس للحركة الخطية نظير فى حالة الحركة الدائرية .

فى الحركة الخطية فرقنا بين متوسط السرعة والسرعة اللحظية وهذا الفرق هام أيضا فى الحركة الزاوية . يعرف متوسط السرعة فى حالة الحركة الخطية بنظير المعادلة (٧ – ٢) . وتستنتج السرعة اللحظية بقياس المسافة المقطوعة فى فترة زمنية قصيرة جدا لدرجة أن السرعة لايمكنها أن تتغير تغيرا محسوسا فى خلال ذلك الزمن .

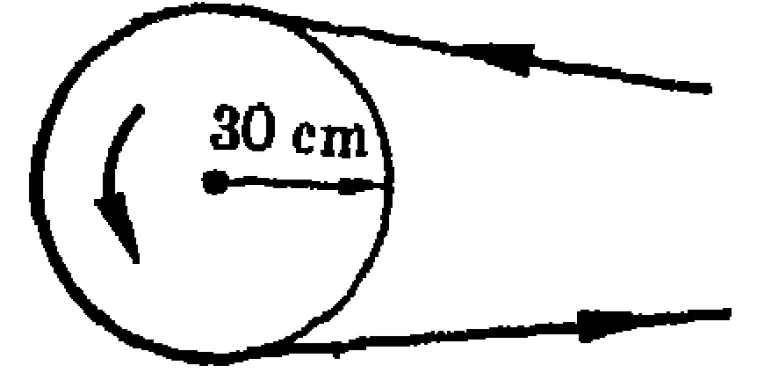
* فى الدراسة الأكثر تقدما تعطى السرعة الزاوية اتجاها بحيث تكون كمية موجهة . ومع ذلك ففى حالة الدوران فى مستوى يكون مقدار معدل الحركة الزاوى والسرعة الزاوية متساويين ، كذلك لاتتغير اتجاه السرعة الزاوية .

ويكتب هذا بالطريقة الآتية ، حيث ω هى السرعة الزاوية اللحظية :

السرعة الزاوية اللحظـية

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad (٧ - ٣)$$

فى هذه العلاقة $\Delta\theta$ هى المسافة الزاوية الصغيرة التى تتحركها العجلة فى زمن صغير قدره Δt ، وتعنى lim أننا نأخذ قيمة هذه النسبة عندما تقترب الفترة الزمنية Δt من الصفر ، كما نوقش فى الفصل الثانى .



شكل (٧ - ٤)
عندما تدور العجلة فإنها تلف أحد طرفى السير وتفك الطرف الآخر .

مثال توضيحى ٧ - ٣ . : فى الشكل ٧ - ٤ تدور العجلة بمعدل 240 rev/min. (أ) ماهى الزاوية التى تدورها العجلة فى 10 s ؟ (ب) واذا كان نصف قطر العجلة 30 cm ، فما هو طول السير الذى تجذبه العجلة فى خلال ذلك الزمن ؟

طريقة الحل : (أ) حيث أن $\bar{\omega} = 240$ rev/min و $t = 10$ s يمكننا بتحويل جميع وحدات الزمن إلى دقائق أن نجد من المعادلة (٧ - ٢) أن :

$$\theta = \bar{\omega}t = (240 \text{ rev/min})(\tfrac{10}{60} \text{ min}) = 40 \text{ rev} = 80\pi \text{ rad}$$

(ب) تذكر أن المعادلة (٧ - ١) يمكن أن تستخدم لإيجاد طول الخيط أو السير الذى تلفه العجلة . وكما فى المثال التوضيحى ٧ - ٢ ، فإن طول السير الذى تلفه العجلة فى الزمن t هو :

$$s = \theta r$$

بشرط أن تقاس θ بالزاوية النصف قطرية . وحيث أننا وجدنا أن $\theta = 80\pi$ ، ونظرا لأن $r = 30$ cm من المعطيات ، فإن :

$$s = (80\pi \text{ rad})(0.30 \text{ m}) = 75.4 \text{ m}$$

لاحظ أن مصطلح الزاوية النصف قطرية (radian) لم يدخل فى المعادلة . وكما نرى من التعريف فإنها ليست وحدة بالمعنى الحرفى للكلمة .

٧ - ٣ التسارع الزاوى α

عرف متوسط التسارع الخطى فى الفصل الثانى بالعلاقة :

$$a = \frac{v_f - v_0}{t}$$

وتقيس هذه الكمية المعدل الذى يتسارع أو يتقاصر به الجسم المتحرك . والكمية $v_f - v_0$ هى التغير فى السرعة خلال الزمن t . ومن المرجح أنك تذكر أن الوحدات النموذجية للتسارع هى المتر فى الثانية المربعة والقدم فى الثانية المربعة .

وفى حالة الأجسام المتحركة حركة دورانية نهتم أساسا بطريقة تسارعها أو (تباطئها) . بناء على ذلك فإننا نهتم فى هذه الحالة بالتسارع الزاوى ، أى بمعدل

تغير السرعة الزاوية . **يعرف متوسط التسارع الزاوى** α (الفا) للعجلة الدائرة أو أى جسم دائر آخر بالعلاقة :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \qquad (٧ - ٤)$$ **متوسط التسارع الزاوى**

ووحداته هى نفس وحدات السرعة الزاوية مقسومة على وحدات الزمن .

فمثلا اذا كان الزمن t مقاسا بالثوانى والسرعة الزاوية ω مقاسة بالزاوية النصف قطرية فى الثانية ، فإن التسارع الزاوى سيكون مقاسا بالزاوية النصف قطرية فى الثانية فى الثانية . وبالرغم من أنه ليس من الخطأ أن تقاس السرعة الزاوية ω بالزاوية النصف قطرية، بينما يقاس الزمن t بالدقيقة ، وعندئذ سيكون التسارع الزاوى α مقاسا بالزاوية النصف قطرية فى الثانية فى الدقيقة ، فإن من المفضل دائما استخدام نفس الوحدات للزمن t .

واذا كان التسارع الزاوى منتظما ، فإن متوسط السرعة الزاوية يعطى ، كما فى حالة الحركة الخطية ، بالعلاقة :

$$\bar{\omega} = \tfrac{1}{2}(\omega_f + \omega_0)$$

مثال توضيحى ٧ – ٤ : بدأت عجلة من السكون ثم اكتسبت سرعة دورانية قدرها 240 rev/min فى زمن قدره 2.0 min . ماهو متوسط التسارع ؟

طريقة الحل : المعطيات

$$\omega_0 = 0 \qquad \omega_f = 240\ \text{rev/s} \qquad t = 2.0\ \text{min} = 120\ \text{s}$$

وباستخدام المعادلة (٧ – ٤)، نجد أن :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} = \frac{240 - 0}{120} = 2\ \text{rev/s}^2$$

٧ – ٤ معادلات الحركة الزاوية

يتضح مما سبق أن معادلات الحركة الزاوية التى كتبناها حتى الآن تشبه تماما معادلات الحركة الخطية ، باستثناء أن الكميات θ ، ω ، α قد حلت محل s ، v ، a على الترتيب . وحيث أن معادلتى الحركة الخطية الباقيتين قد اشتقتا بالمعالجة الجبرية للمعادلات الثلاث الأولى ، فإن المعادلتين النظيرتين سوف تنطبقان أيضا على الحركة الزاوية . وسنذكر فيمايلى معادلات الحركة الزاوية الخمس مصحوبة بنظيراتها فى حالة الحركة الخطية .

معادلات الحركة الزاوية الخمس

	معادلات الحركة الخطية	معادلات الحركة الزاوية
(٧ - ٥)	$s = \bar{v}t$	$\theta = \bar{\omega}t$
(٧ - ٦)	$v_f = v_0 + at$	$\omega_f = \omega_0 + \alpha t$
(٧ - ٧)	$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f + v_0)$	$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_f + \omega_0)$
(٧ - ٨)	$2as = v_f^2 - v_0^2$	$2\alpha\theta = \omega_f^2 - \omega_0^2$
(٧ - ٩)	$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$	$\theta = \omega_0t + \frac{1}{2}\alpha t^2$

يلاحظ أن المعادلات الأربع الأخيرة من (٧ - ٦) إلى (٧ - ٩) لاتنطبق دائما . ومن الضرورى أن نتذكر أن المعادلاتين (٧ - ٦) و (٧ - ٧) صحيحة فقط فى حالة التسارع الثابت . وحيث أن المعادلتين (٧ - ٨) و (٧ - ٩) قد اشتقتا من المعادلتين السابقتين ، فإن المعادلات الثلاث من (٧ - ٧) إلى (٧ - ٩) تقتصر فقط على حالات التسارع المنتظم .

مثال توضيحى ٧ - ٥ : أوقفت مروحة كهربية عندما كانت تدور بمعدل 3.0 rev/min ثم وصلت إلى السكون بعد زمن قدره 18 s . ماهو تقاصر المروحة بفرض أنه منتظم ؟ وماعدد الدورات التى تدورها المروحة قبل أن تصل الى السكون (التقاصر ليس ثابتا عمليا) .

طريقة الحل : هذه مسألة نموذجية للحركة الزاوية . نعلم أن :

$$\omega_0 = 3.0 \text{ rev/s} \qquad \omega_f = 0 \qquad t = 18 \text{ s}$$
$$\alpha = ? \qquad \theta = ?$$

من معادلة تعريف التسارع الزاوى α [المعادلة (٧ - ٦)]:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} = \frac{0 - 3.0 \text{ rev}}{18 \text{ s}^2} = -0.167 \text{ rev/s}^2$$

ولايجاد θ يمكننا استخدام المعادلة (٧ - ٩) :

$$\theta = \omega_0t + \tfrac{1}{2}\alpha t^2$$
$$= (3.0 \text{ rev/s})(18 \text{ s}) + \tfrac{1}{2}(-0.167 \text{ rev/s})(18 \text{ s})^2 = 27 \text{ rev}$$

٧ - ٥ الكميات المماسية

عندما تفك العجلة خيطا أو تتدحرج على الأرض فإنها تتحرك حركتين إحداهما دورانية والأخرى خطية . والمطلوب الآن هو إيجاد العلاقة بين هذين النوعين من الحركة . والعلاقة بين المسافتين الخطية والزاوية ، s و θ ، تمثلها المعادلة (٧ - ١) وهى معادلة تعريف المقياس الزاوى . ولتوضيح ذلك لنرجع إلى الشكل ٧ - ٥ .

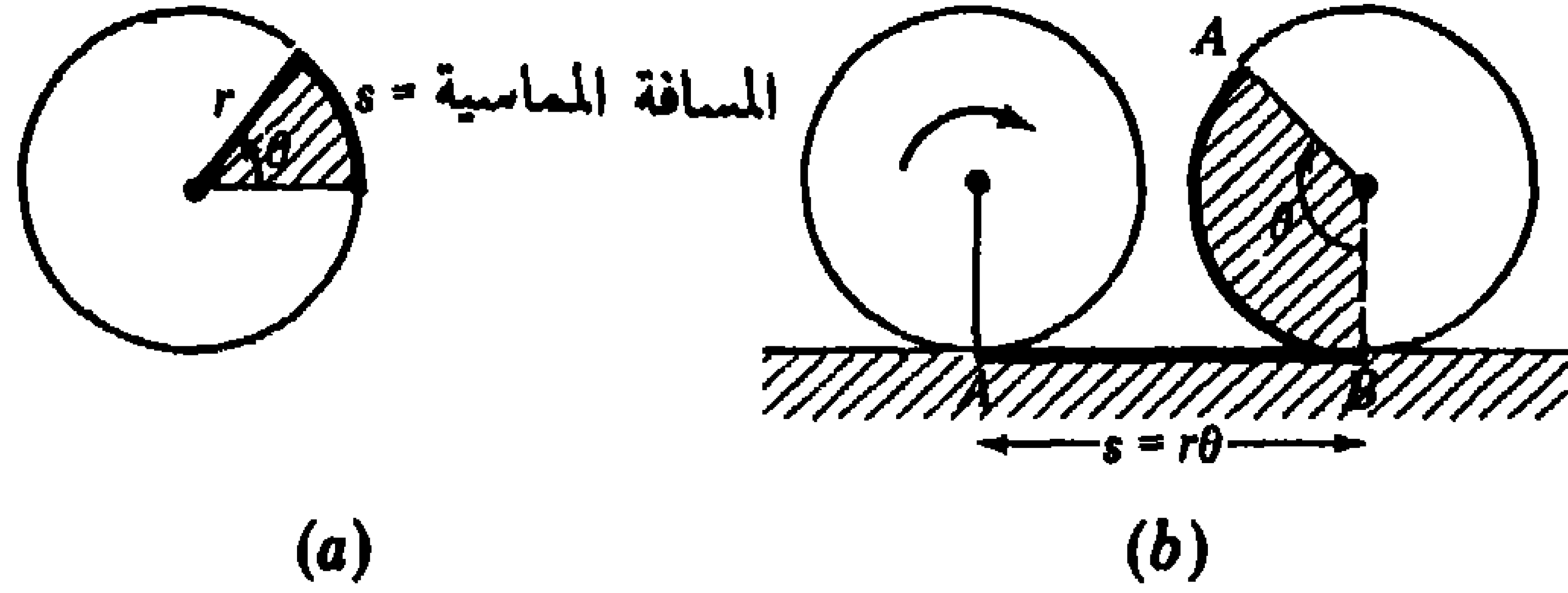
كما هو واضح من شكل ٧ - ٥ أ ، عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ فإن أى نقطة على حافتها ترسم قوسا طوله s . ومن معادلة تعريف المقياس الزاوى نرى أن :

$$s = r\theta$$

بشرط أن تكون θ مقاسة بالزاوية النصف قطرية . وسوف تسمى المسافة s **بالمسافة المماسية** لأنها تقاس مماسية لحافة العجلة .

العلاقة بين المسافتين المماسية والزاوية

وإذا نظرنا الى الشكل ٧ – ٥ ب فإننا سنجد أن العجلة تتدحرج مسافة خطية تعطى بالعلاقة $s = r\theta$. وتمكننا هذه الحقيقة من ربط الحركة الخطية للعجلة المتدحرجة بحركتها الزاوية . وقد رأينا سابقا فى الشكلين ٧ – ٣ و ٧ – ٤ أن طولا مماسيا قدره $s = r\theta$ من الخيط أو السير يلتف على العجلة عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ . وفى جميع الحالات المشابهة :



شكل (٧ – ٥)
عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ فإنها تقطع مسافة قدرها $s = r\theta$.

$$\text{المسافة المماسية} = s = r\theta \qquad (٧ – ١٠)$$

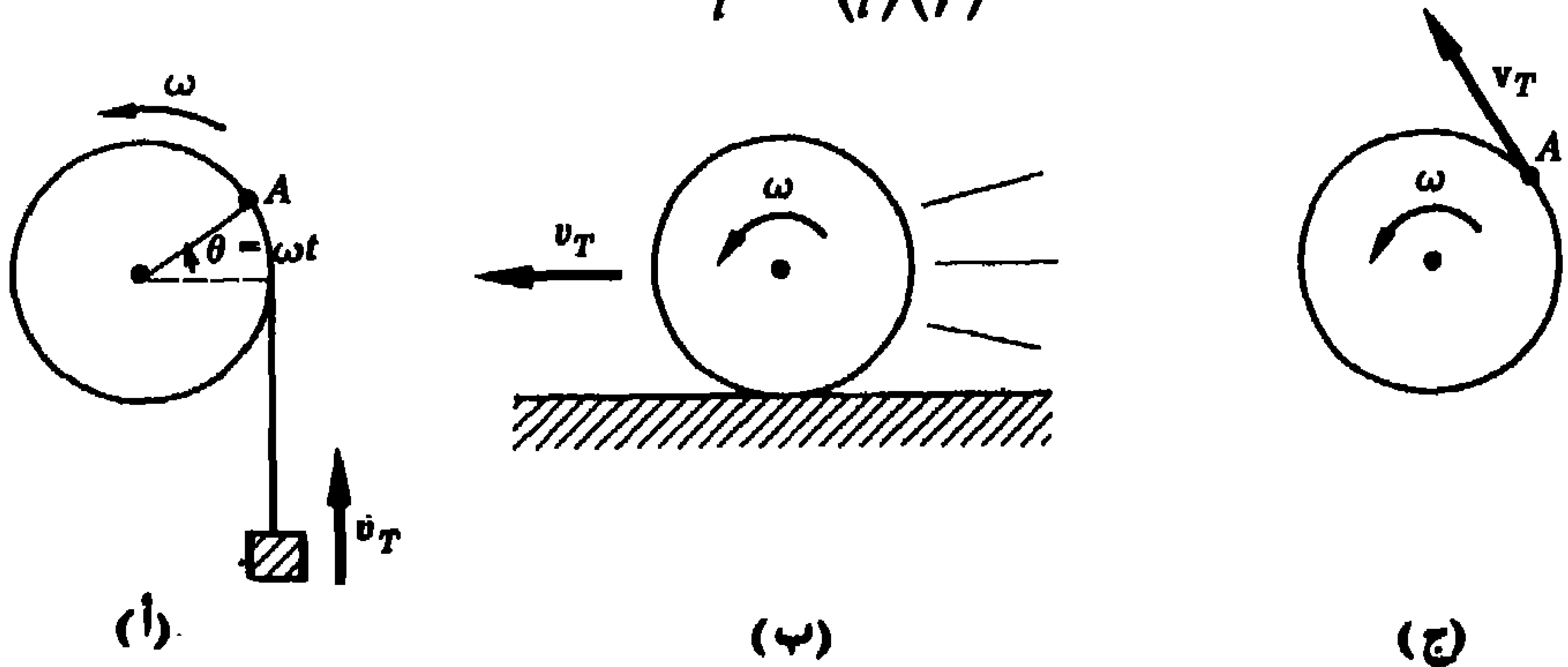
ونؤكد مرة ثانية أن θ يجب أن تكون مقاسة بالزاوية النصف قطرية .

لنفرض أن العجلة تدور بسرعة زاوية ثابتة ω . وعندما تفعل العجلة ذلك تستمر θ فى التغير كما هو موضح بالشكل ٧ – ٦ أ . من تعريف ω نجد أن :

$$\omega = \frac{\theta}{t} ،$$

حيث θ هى الزاوية المقطوعة فى زمن t . ولكن θ ترتبط بالمسافة المماسية تبعا للعلاقة $s = r\theta$ ، وعليه فعند التعويض سنحصل على :

$$\omega = \frac{s/r}{t} = \left(\frac{s}{t}\right)\left(\frac{1}{r}\right)$$



شكل (٧ – ٦)
ترتبط السرعة الزاوية ω بالسرعة المماسية v_T تبعا للعلاقة $v_T = \omega r$. وفى هذه العلاقة يجب أن تكون ω مقاسة بالزاوية النصف قطرية فى وحدة الزمن .

ولكن s/t ببساطة هى معدل حركة النقطة A على حافة العجلة نتيجة للحركة الدورانية للعجلة . أو ، بطريقة أخرى ، هى معدل الحركة الخطى للنقطة المركزية للعجلة فى شكل ٧ - ٦ ب . وسوف نسمى هذه الكمية بمعدل الحركة المماسى v_T . وبالتعويض عن $v_T = s/t$ واعادة الترتيب نجد أن :

$$\text{معدل الحركة المماسى} = v_T = \omega r$$

وهذه هى أيضا السرعة المماسية للنقطة A فى شكل ٧ - ٦ جـ .

وإذا كانت السرعة الزاوية ω للعجلة الدائرة متزايدة فإن v_T يجب أن تكون أيضا متزايدة . ويعطى التسارع الزاوى بالعلاقة :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t}$$

حيث $\omega_f - \omega_0$ هو تغير ω فى زمن قدره t . ولكن حيث أن $\omega = v_T/r$، يمكننا أن نكتب هذه العلاقة كمايلى :

$$\alpha = \frac{v_{Tf} - v_{T0}}{rt} \qquad \text{أو} \qquad \frac{v_{Tf} - v_{T0}}{t} = \alpha r$$

العلاقة بين التسارعين المماسى والزاوى

ولكن هذه الكمية ببساطة هى معدل تغير السرعة المماسية . وسوف نسميه **بالتسارع المماسى** a_T . إذن :

$$\text{التسارع المماسى} = a_T = \alpha r \qquad (٧ - ١٢)$$

وهى أيضا التسارع الخطى لمركز العجلة المتدحرجة أو الخيط المفكوك .

مثال توضيحى ٧ - ٦ : بدأت سيارة قطر عجلاتها 80 cm الحركة من السكون وتسارعت بانتظام الى سرعة قدرها 20 m/s فى 9 s . اوجد التسارع الزاوى والسرعة الزاوية النهائية لإحدى عجلاتها .

طريقة الحل : نعلم أن السرعة الخطية والتسارع الخطى لمركز العجلة يعطيان بالعلاقتين المماسيتين (٧ - ١١) و (٧ - ١٢) كالتالى :

$$v_T = \omega r \qquad \text{و} \qquad a_T = \alpha r$$

ولكن القيمة النهائية للسرعة v_T هى 20 m/s. إذن :

$$\omega_f = \frac{v_{Tf}}{r} = \frac{20\ \text{m/s}}{0.40\ \text{m}} = 50\ \text{rad/s}$$

لاحظ كيف يجب أن ندخل المقياس الزاوى المناسب لأن الوحدات الزاوية ليست موجودة فى المعادلات . لماذا استخدمنا الزاوية النصف قطرية فى الثانية كوحدة للسرعة وليس الدورة فى الثانية ؟

لإيجاد التسارع يجب أن نحل مسألة الحركة الخطية.أولا نعلم أن :

$$v_0 = 0 \qquad v_f = 20\ \text{m/s} \qquad t = 9.0\ \text{s} \qquad a = ?$$

اذن :

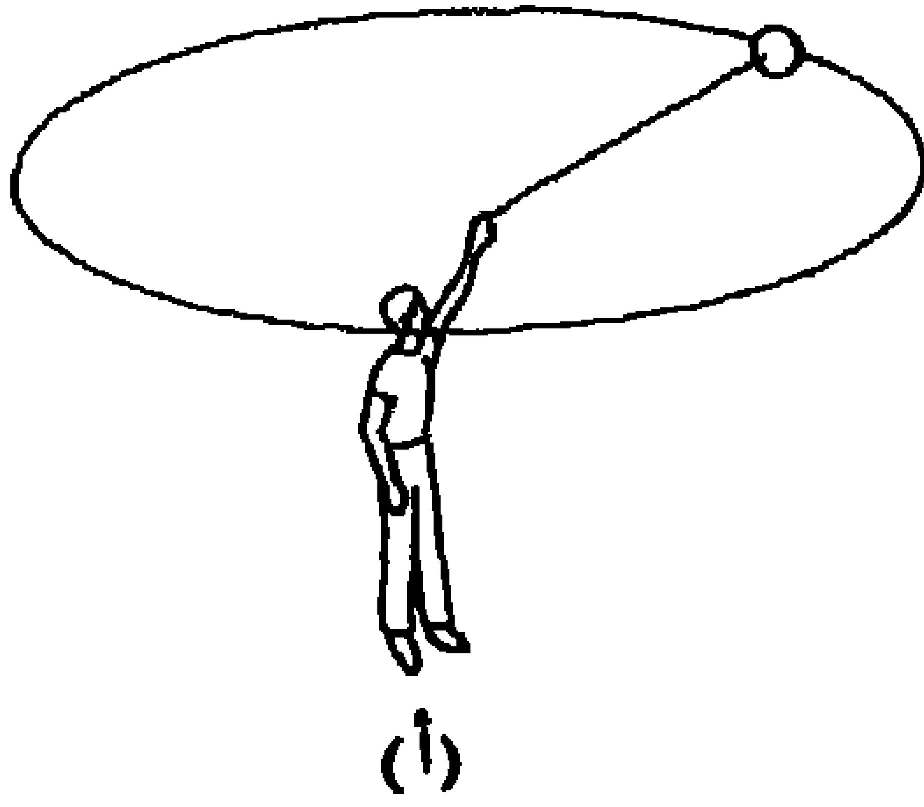
$$a = \frac{v_f - v_0}{t} = \frac{20 - 0}{9.0}\ \text{m/s}^2 = 2.22\ \text{m/s}^2$$

وحيث أن هذه القيمة للتسارع a هى بالفعل a_T ، يمكننا أن نكتب العلاقة التالية :

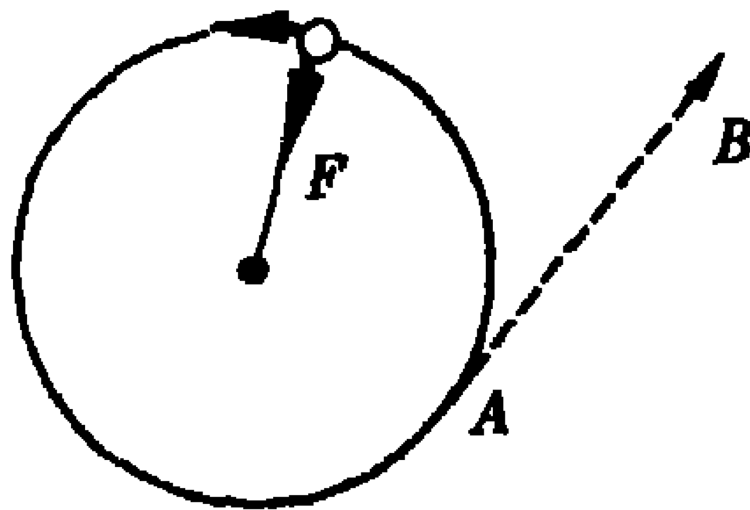
$$\alpha = \frac{a_T}{r} = \frac{2.22\ \text{m/s}^2}{0.40\ \text{m}} = 5.55\ \text{rad/s}^2$$

لاحظ مرة اخرى أننا يجب أن نستخدم الوحدات الزاوية المناسبة (زاوية نصف قطرية ، فى نتيجتنا) .

٧ - ٦ الكميات النصف قطرية والقوة الجاذبة المركزية



(أ)



(ب)

شكل (٧ - ٧)
الشد F فى الخيط هو الذى يحفظ الكرة فى المسار الدائرى . وإذا قطع الخيط عند وجود الكرة فى النقطة A فإنها سوف تستمر فى الحركة فى خط مستقيم تجاه النقطة B بشرط إهمال الجاذبية .

كان اهتمامنا حتى الآن مقصور على الحركة على محيط الدائرة ولم نقل شيئا عن القوى التى تسبب حركة الجسم فى هذا المسار الدائرى . وسوف نرى فى هذا الفصل أن القوة النصف قطرية ، أى القوة الموجهة فى اتجاه نصف القطر ، ضرورية لكى يتحرك الجسم على محيط الدائرة . وهذه القوة النصف قطرية تكسب الجسم تسارعا نصف قطرى . وليس من الطبيعى أن يتحرك الجسم فى دائرة ، وقد علم نيوتن ذلك عند صياغته لقوانين الحركة . فى الواقع أن نيوتن ذكر أن الجسم يسير فى خط مستقيم مالم يجبر على غير ذلك . ونحن نعلم جميعا أن الكرة التى تدور فى دائرة أفقية فى نهاية خيط لن تستمر فى مسارها الدائرى اذا انقطع الخيط . وسرعان ماتبين المشاهدات الدقيقة أنه إذا ماقطع الخيط عند وجود الكرة فى النقطة A فى شكل ٧ - ٧ ب فإن الكرة سوف تتبع المسار الخطى المستقيم AB كما أكد نيوتن .

والحقيقة أنه مالم يجذب الخيط - أو أية آلية اخرى - الكرة فى اتجاه مركز الدائرة بقوة قدرها F كما هو مبين فى الشكل ٧ - ٧ ، فإن الكرة لن تستمر فى الحركة فى المسار الدائرى . وتسمى القوة اللازمة لتحويل المسار المستقيم المعتاد للجسيم الى مسار دائرى **بالقوة الجاذبة المركزية** . لاحظ أن هذه القوة هى الجذب المؤثر على الجسم وأنها موجهة فى اتجاه مركز الدائرة ، أى أنها قوة نصف قطرية .

وتبين قوانين الحركة لنيوتن حقيقة أخرى يصعب قبولها فى بعض الأحيان . فحيث أن الشيء الوحيد الذى يجذب الكرة فى الشكل ٧ - ٧ هو الخيط (اهمل الجاذبية الآن) ، فإن القوة الجاذبة المركزية F التى يؤثر بها الخيط على الكرة هى **قوة غير متزنة** . ومن قانون نيوتن الثانى :

$$F = ma$$

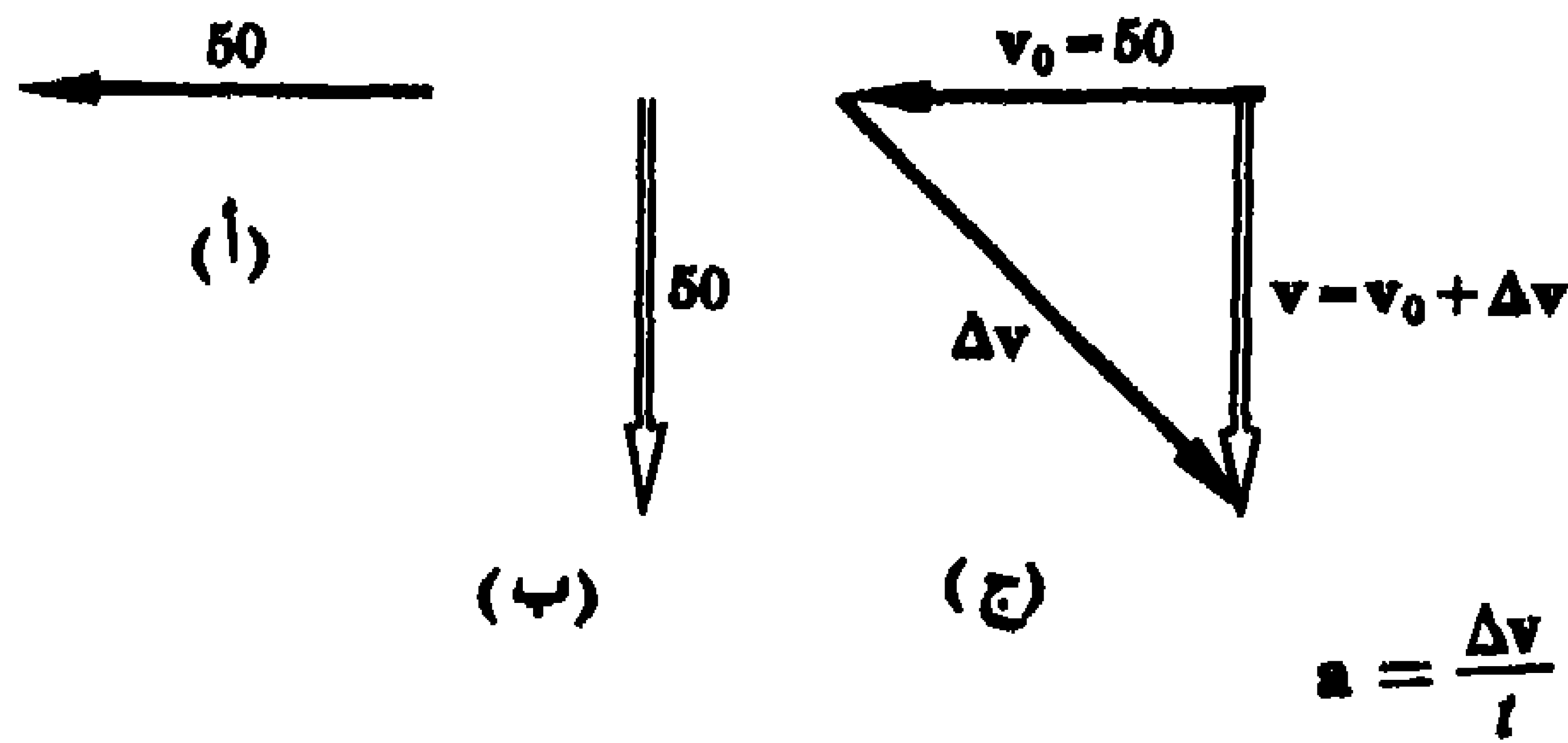
وحيث أن القوة غير المتزنة F لاتساوى صفرا ، فإن الكرة يجب أن تتسارع وهذا صحيح بالرغم من أن الكرة تسير على الدائرة بسرعة زاوية ثابتة !

وحيث أن $\mathbf{F}$ و $\mathbf{a}$ متجهان و m كمية غير موجهة فإن التسارع الذى تنبأنا به يجب أن يكون فى نفس اتجاه القوة ، وعليه فإنه يجب أن يكون متجها نحو مركز الدائرة . ومن الواضح أن التسارع الذى تنبأ به قانون نيوتن ليس فى الاتجاه الصحيح ليزيد من سرعة الكرة فى مسارها الدائرى أو ينقصها . ولكى نفهم طبيعة التسارع الذى تسببه القوة الجاذبة المركزية يجب أن نعود إلى المفاهيم الأساسية المتعلقة بذلك . لنتأمل تعريفى السرعة والتسارع .

أولا، عرفنا السرعة كمتجه ، وثانيا ، عرفنا التسارع بأنه معدل تغير هذه السرعة الموجهة . لاحظ أن سرعة الجسم ، المعرفة كمتجه ، يمكن أن تتغير بالرغم من أن القيمة العددية للسرعة وهى مجرد عدد ، يمكن أن تظل ثابتة . وكمثال لذلك ، اعتبر سيارة تتحرك بمعدل قدره 50 km/h نحو الشرق ثم تنعطف لتسير بنفس معدل الحركة 50 km/h ولكن إلى الجنوب . يمكننا تمثيل متجهات السرعة بيانيا كما هو مبين فى الشكل ٧ – ٨ أ ، ب .

من الواضح أن السرعة الموجهة قد تغيرت . لايجاد التغير فى متجه السرعة يجب إيجاد متجه السرعة $\Delta\mathbf{v}$ الذى يلزم إضافته الى متجه السرعة الأصلى $\mathbf{v}_0$ للحصول على متجه السرعة النهائية $\mathbf{v}$ ، وهذا موضح فى الشكل ٧ – ٨ جـ .

لاحظ أن معدل حركة الجسم المتحرك فى شكل ٧ – ٨ لم يتغير ولكن السرعة قد تغيرت . أى أن اتجاه الحركة قد تغير . ومن تعريف متوسط التسارع نجد أن :



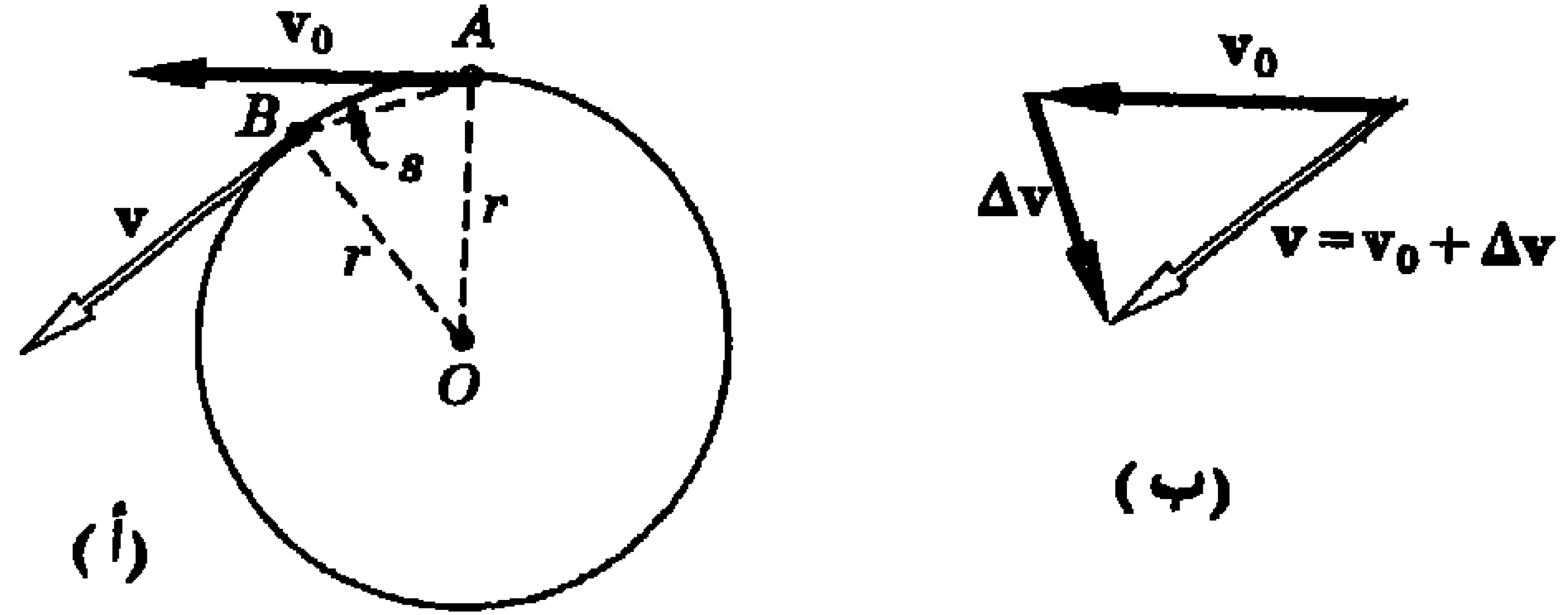
شكل (٧ – ٨)
لكى تتغير السرعة $\mathbf{v}_0$ وقدرها 50 km/h غربيا كما هو مبين فى (أ) إلى السرعة $\mathbf{v}$ وقدرها 50 km/h جنوبيا كما هو مبين فى (ب) يجب إضافة التغير $\Delta\mathbf{v}$ إلى $\mathbf{v}_0$ كما هو مبين فى (جـ) .

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta\mathbf{v}}{t}$$

حيث t هو الزمن اللازم للتغير $\Delta\mathbf{v}$ فى السرعة . وهذا هو نوع التسارع الموجود عندما يتحرك الجسم فى دائرة . وبالرغم من أن معدل الحركة أو القيمة العددية للسرعة لايتغير فإن اتجاه الحركة يتغير تحت تأثير القوة الجاذبة المركزية . لنفحص الآن هذه الحالة بتفصيل أكثر لكى نحصل على التعبير الرياضى للقوة اللازمة لحفظ الجسم فى مسار دائرى .

تأمل مايحدث عندما تتحرك الكرة من A الى B فى شكل ٧ – ٩ أ . حيث أن سرعة الكرة قد تغيرت فى الاتجاه وليس فى المقدار فإن التغير فى السرعة هو كما يبينه الشكل ٧ – ٩ ب . وبناء على ذلك فإن تسارع الكرة سيكون :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$



شكل (٧ – ٩)
مثلث المتجهات فى (ب) والمثلث OAB فى (أ) متشابهان لأن اضلاع المثلثين متعامدين كل منها على الآخر .

حيث Δt هو الزمن الذى تأخذه الكرة لكى تتحرك من A الى B . وفى آخر الأمر نأخذ النهاية عندما تقترب Δt من الصفر ، وفى هذه الحالة ستكون a هى التسارع اللحظى .

وحيث أن معدل حركة الكرة هو v والمسافة التى قطعتها هى s كما هو مبين فى الشكل ٧ – ٩ أ فإن الزمن المنصرم هو :

$$\Delta t = \frac{s}{v}$$

ومنه نجد بعد التعويض عن a فى المعادلة أن :

$$a = \frac{v\Delta v}{s}$$

لنقارن الآن المثلث OAB بالمثلث المبين فى الجزء ب من شكل ٧ – ٩ . من الواضح أن OA عمودى v_0 وأن OB عمودى على v ، BA عمودى على Δv وعلى ذلك فإن المثلثين متشابهان ويمكننا إذن أن نكتب العلاقة التالية :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\overline{BA}}{r}$$

ولكن اذا كانت النقطة A قريبة من B على الدائرة ، وهذا يحدث عندما $\Delta t \to 0$ فإن طول القوس من B الى A سيكون مساويا تقريبا لطول الخط $\overline{BA}$. فى حدود هذا التقريب يمكننا أن نعتبر أن $\overline{BA} = s$ ، وعليه فإن العلاقة السابقة تصبح :

$$\Delta v = \frac{sv}{r}$$

فى النهاية عندما $\Delta t \to 0$.

Δv

تسارع الجذب المركزى

وبالتعويض عن قيمة v فى معادلة التسارع a نحصل على :

$$a = \frac{v^2}{r} \qquad (٧ - ١٣)$$

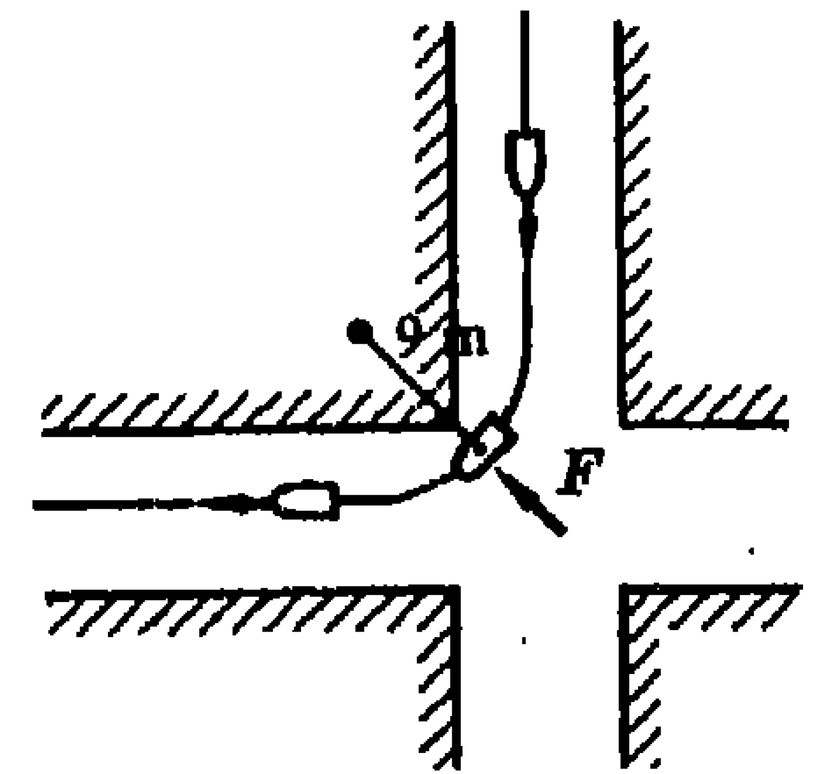
حيث a تمثل الآن التسارع اللحظى لأنها أوجدت عند النهاية عندما $\Delta t \to 0$. ويسمى هذا التسارع الذى تسببه القوة الجاذبة المركزية **بتسارع أو عجلة الجذب المركزى** . وفى النهاية فإن القوة الجاذبة المركزية تعطى بالعلاقة $F = ma$ ، لذلك فإن :

القوة الجاذبة المركـزيـة

$$F_{\text{centripetal}} = \frac{mv^2}{r} \qquad (٧ - ١٤)$$

بالاضافة الى ذلك فإن اتجاه **a** ، وكذلك اتجاه $\mathbf{F}_{\text{ccentripetal}}$ هو نفس اتجاه $\Delta \mathbf{v}$. ولكننا نرى من الشكل ٧ – ٩أن $\Delta \mathbf{v}$ عمودية على المنصف العمودى للزاوية بين v و $\mathbf{v}_0$ ، وعليه فإنها موجهة فى اتجاه نصف قطر الدائرة عند منتصف القوس بين A و B فى الشكل ٧ – ٩ أ . وعندما $\Delta t \to 0$ فإن القوس بين A و B يقترب أيضا من الصفر . يستنتج من ذلك إذن أن التسارع اللحظى لجسم يتحرك بمعدل حركة منتظم فى دائرة يتجه الى الداخل نحو مركز الدائرة . وهذا هو السبب فى تسميته **بالتسارع النصف قطرى** ، واتجاه القوة الجاذبة المركزية هو أيضا نفس الاتجاه .

تبين لنا المعادلة (٧ – ١٤) أن القوة اللازمة لحفظ جسم فى مسار دائرى تتناسب مع مربع سرعة الجسم مضروبا فى كتلته . ولذلك فكلما زادت كتلة الجسم كلما أسرع فى دورانه ، وكلما زاد أيضا الشد فى الحبل الذى يقيد حركته فى دائرة . وهذه خبرة عامة للكثير منا . ويمكن بسهولة اثبات حقيقة أن القوة الجاذبة المركزية تزدادا كلما نقص نصف قطر الدائرة بادارة قطعة من الطباشير مربوطة فى خيط فى دائرة . تذكر مع ذلك عند اجراء هذه التجربة أنه اذا كانت v ثابتة فى المقدار فسيلزم لقطعة الطباشير زمن أقل لكى تقطع دائرة صغيرة مما يلزمها لقطع دائرة كبيرة . وعليه فإن معدل الحركة الزاوية للجسيم سيكون أكبر فى حالة الدائرة الصغيرة حتى اذا كان معدل الحركة الخطى للجسم ثابتا .



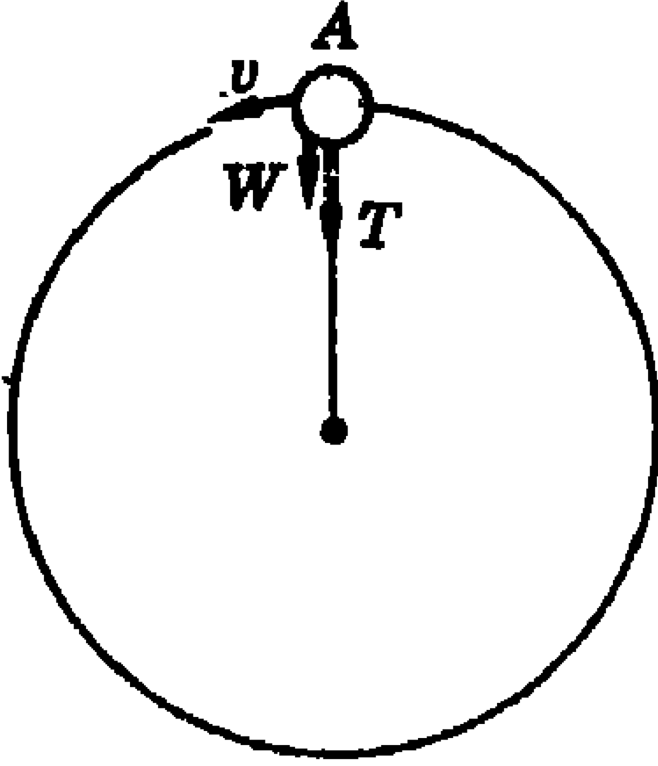
شكل (٧ – ١٠)
لكى تتمكن السيارة من الانعطاف حول ملتقى الشارعين كما هو مبين لابد أن توفر قوة الاحتكاك F بين الاطارات والطريق القوة الجاذبة المركزية اللازمة لحفظ السيارة فى مسار دائرى .

مثال توضيحى ٧ – ٧ : تنعطف سيارة كتلتها 1200 kg عند ملتقى شارعين بمعدل قدره 8.0 m/s متحركة على قوس دائرة فى هذه العملية . إذا كان نصف قطر الدائرة التى يمثل القوس جزءا منها هو 9.0 m فما هى القوة الأفقية التى يجب أن يؤثر بها الطريق على الاطارات بحيث تحفظ السيارة فى هذا المسار ؟ (انظر شكل ٧ – ١٠) .

طريقة الحل : القوة اللازمة هى القوة الجاذبة المركزية .

$$F = m\frac{v^2}{r} = (1200\text{ kg})\left(\frac{64\text{ m}^2/\text{s}^2}{9.0\text{ m}}\right) = 8530\text{ N}$$

ويجب أن تنشأ هذه القوة نتيجة لقوة الاحتكاك بين أرضية الطريق والعجلات . هل يمكنك أن تثبت أن معامل الاحتكاك يجب أن يكون 0.73 على الأقل لكى تتوفر هذه القوة الكبيرة ؟ واذا كان الطريق مبتلا بحيث يصبح الاحتكاك بين الاطارات والطريق صغيرا ، فإن قوة الاحتكاك المؤثرة على الاطارات قد لاتصل الى هذه القيمة . وفى هذه الحالة سوف تزحف السيارة جانبا خارجة عن المسار الدائرى (فى خط مستقيم تقريبا) وقد لاتستطيع الانعطاف فى منحنى .



شكل (٧ – ١١)
عندما تكون الكرة فى الوضع المبين فإن وزنها ينتج جزءا من القوة الجاذبة المركزية الضرورية .

مثال توضيحى ٧ – ٨ : تتأرجح كرة مربوطة فى نهاية خيط فى دائرة رأسية نصف قطرها r تحت تأثير الجاذبية كما هو مبين فى شكل ٧ – ١١ . ماقيمة الشد فى الخيط عندما تكون الكرة عند النقطة A على المسار كما هو مبين فى الشكل ٧ – ١١ إذا كان معدل حركة الكرة عند هذه النقطة هو v ؟

طريقة الحل : لكى تتحرك الكرة فى دائرة لابد أن تكون محصلة القوى المؤثرة عليها نحو مركز الدائرة . وفى هذه الحالة تؤثر على الكرة عند وجودها عند النقطة A قوتان هما جذب الخيط T وجذب الأرض (أو وزن الجسم) ، ومحصلة هاتين القوتين يجب أن تكون متجهة نحو مركز الدائرة . وهذه القوة المحصلة هى التى تقدم القوة الجاذبة المركزية اللازمة لاستمرار الكرة فى الحركة فى المسار الدائرى . يمكننا اذن أن نكتب القوة المحصلة المؤثرة على الكرة عند النقطة A وهى $(T + W)$ مساوية للقوة الجاذبة المركزية المطلوبة وهى (mv^2/r) :

$$T + W = \frac{mv^2}{r}$$

بناء على ذلك فإن الشد فى الخيط هو :

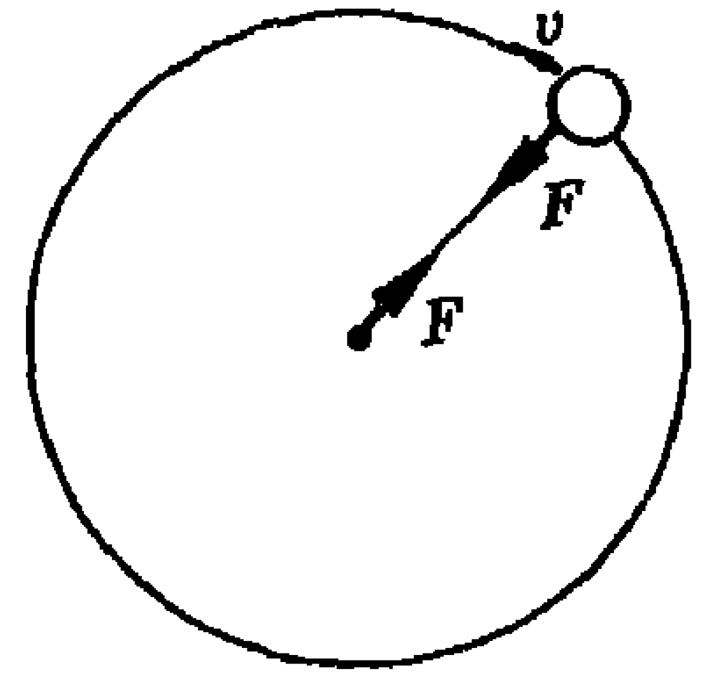
$$T = \frac{mv^2}{r} - W = m\left(\frac{v^2}{r} - g\right)$$

لاحظ أنه اذا كانت $v^2/r = g$ فإن الشد فى الخيط سيكون صفرا ، وعليه فإن القوة الجاذبة المركزية ستساوى تماما الوزن . وهذه هى الحالة التى تحفظ الكرة فى المسار الدائرى . واذا كان معدل حركة الكرة v أقل من القيمة المعطاة بهذه العلاقة ، أى اذا كان $v < \sqrt{rg}$ فإن القوة الجاذبة ستكون أقل من وزن الكرة . وفى هذه الحالة ستسقط الكرة الى أسفل تاركة المسار الدائرى .

٧ – ٧ القوة الطاردة المركزية

يخبرنا قانون الفعل ورد الفعل لنيوتن أن لكل قوة مؤثرة على جسم ما هناك قوة مساوية لها فى المقدار ومضادة فى الاتجاه تؤثر على جسم أو أجسام أخرى . وعليه

فإذا كانت القوة الجاذبة المركزية تؤثر على جسم ما لكى تحفظه فى مسار دائرى ، فلابد من وجود جسم آخر يقع تحت تأثير قوة مساوية فى المقدار للقوة الجاذبة المركزية ومضادة لها فى الإتجاه وتسمى هذه القوة الثانية (المؤثرة على جسم ثان وليس على نفس الجسم الذى يتحرك فى دائرة ، **بالقوة الطاردة المركزية** .



شكل (٧ - ١٢)
تؤثر القوة الجاذبة المركزية على الكرة وتجذبها نحو مركز الدائرة . أما القوة الطاردة المركزية المساوية فى المقدار والمعاكسة فى الأتجاه فإنها تؤثر على يد الشخص الذى يمسك الخيط عند مركز الدائرة وتجذبها الى الخارج من مركز الدائرة كما هو مبين .

فى الشكل ٧ - ١٢ تؤثر القوة الجاذبة المركزية على الكرة لتحفظها فى المسار الدائرى . ويجب أن تؤثر هذه القوة فى اتجاه مركز الدائرة . ومع ذلك فإن الشخص الذى يمسك الخيط فى مركز الدائرة يتعرض لشد الى الخارج نحو الكرة . وهذه القوة تساوى القوة الجاذبة المركزية ولكنها تضادها فى الإتجاه . بالإضافة الى ذلك فإن هذه القوة لاتؤثر على الكرة ، بل تؤثر على الشخص أو الجسم الذى يمسك الكرة . وهذه القوة الأخيرة هى التى نسميها بالقوة الطاردة المركزية .

٧ - ٨ اعتقاد خاطىء شائع

من المحتمل أن يسارع الناس الى استنتاجات خاطئة تماما عند تفسير تجاربهم فمثلا ، قد يظن شخص جالس فى وسط مقعد سيارة أنه تعرض لدفع الى جانب السيارة عند انعطافها حول ملتقى طريقين متعامدين.وقد يؤكد هذا الشخص أن القوة التى دفعته جانبا كانت كبيرة لدرجة أنها قذفته الى جانب السيارة بشدة تكفى لإصابته . وهذا بالطبع محض هراء . فلا وجود لشبح خفى يدفعه تجاه جانب السيارة . وبالتأكيد ليس هناك أى جسم مادى يمكن أن يقوم بدفعه فى هذا الاتجاه . لابد إذن أن يكون هذا الشخص مخطئا .

ولكن نفس الشخص لن يدعى أن قوة خفية قد أثرت عليه عند توقف السيارة فجأة دافعه اياه بشدة على لوحة اجهزة قياس السيارة فهو يعلم أن كمية تحركه يمكن أن تفقد فقط ماإذا أعاقت حركته قوة ما . لذلك فعندما تقف السيارة فجأة فإنه يستمر فى الحركة الى الأمام حتى تبدأ لوحة أجهزة قياس السيارة فى التأثير عليه بقوة لايقافه عن الحركة الى الامام . وهذا ليس إلا مثال لفكرة نيوتن من أن الاشياء تستمر فى الحركة الى أن تؤثر عليها قوة تسبب ايقافها .

وبالمثل فى حالة السيارة التى تنعطف حول ملتقى الطريقين ، فهنا يدفع الاحتكاك بين الطريق والاطارات أفقيا ويغير من حركتها فى خط مستقيم . ويكون الوضع سيئا للغاية بالنسبة الى شخص يجلس فى منتصف مقعد حيث لاوجود للاحتكاك تقريبا ، لأن قوة الاحتكاك بين المقعد وبنطلون الشخص الجالس أصغر من أن تستطيع تغيير حركته فى خط مستقيم . لذلك فإنه سوف يتزحلق فى خط مستقيم الى أن يصطدم بجانب السيارة الذى يؤثر عليه عندئذ بقوة تسبب تحركه فى نفس المسار الذى تتبعه السيارة .

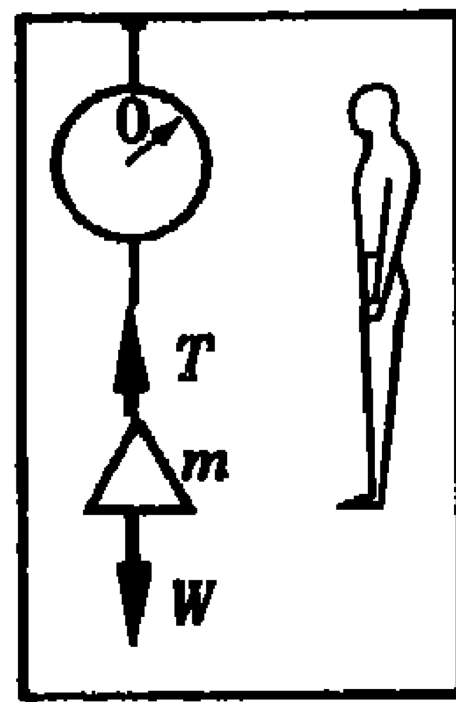
٧ - ٩ انعدام الوزن

تسمع كثيرا أن الاجسام تبدو عديمة الوزن فى سفينة فضاء تدور حول الأرض أو فى طريقها الى نقطة بعيدة فى الفضاء . لنفحص هذه الظاهرة ببعض التفصيل . أولا يجب علينا أن نذكر تعريف الوزن مرة ثانية . يعرف الوزن بأنه شد الجاذبية الأرضية للجسم المعنى . ووزن الجسم على الأرض هو قوة الجاذبية الأرضية المؤثرة على الجسم . بالمثل فإن وزن الجسم على القمر هو قوة جاذبية القمر المؤثرة على الجسم .

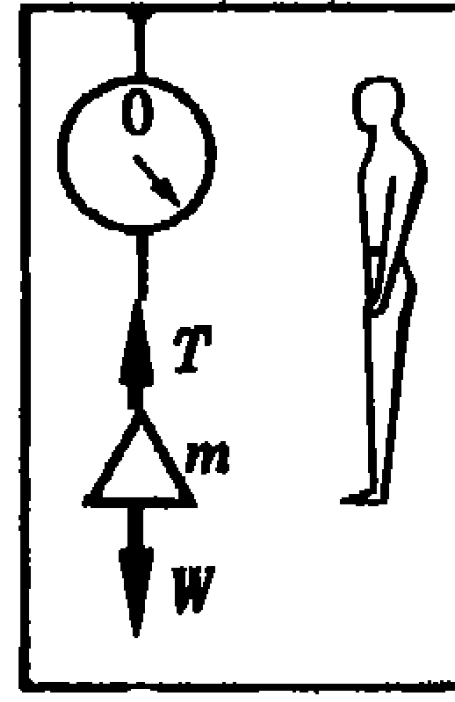
ومن المعتاد قياس وزن جسم ما بوضعه على كفة ميزان . واذا أريد معرفة الوزن بالتقريب يمكنك ملاحظة القوة التى يؤثر بها الجسم على يدك فى حالة السكون . وعادة تكون القوة التى يقرأها الميزان ، أى القوة التى يؤثر بها الجسم على كفة الميزان ، وكذلك القوة التى تؤثر على يد تحمل الجسم مساوية لقوة شد الجاذبية الأرضية للجسم ، أى وزن الجسم . ومع ذلك فإن هذا ليس صحيحا دائما كما سوف نرى ، وعليه فإننا سوف نستخدم اصطلاح **الوزن الظاهرى** للدلالة على قراءة الميزان أو القوة التى تؤثر على اليد بالاضافة الى غير ذلك من الطرق غير الاساسية الشائعة لتقدير وزن الجسم .

لتوضيح هذه النقطة سندرس الوزن الظاهرى لجسم كتلته m فى مصعد . وقد سبق أن نوقش هذا الموضوع فى الفصل الثالث ، ولكننا سوف ندرسه مرة أخرى هنا . اذا كان المصعد - المبين فى الشكل ٧ - ١٣ أ ساكنا فإن قانون نيوتن الثانى يخبرنا أن القوة المحصلة المؤثرة على الجسم تساوى صفرا لأن التسارع يساوى صفرا . واذا كانت قوة الجذب المؤثرة على الجسم (وزنه) هى W والشد فى الخيط الذى يحمل الجسم هو T فإن :

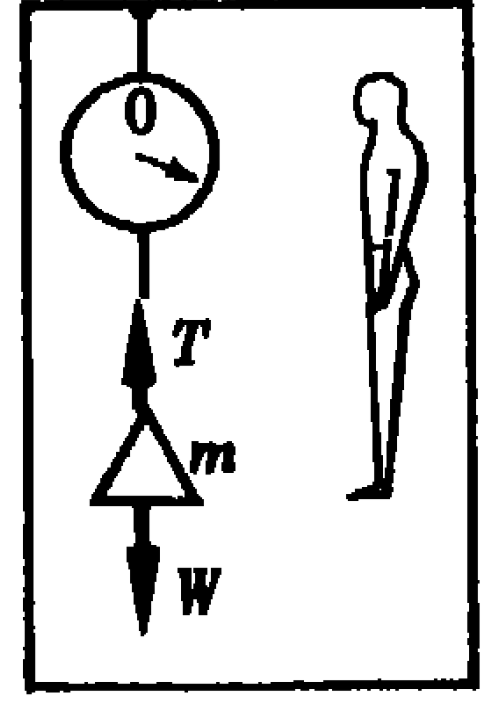
$$T = W \quad \text{أو} \quad T - W = 0$$



a الى أسفل
$W - T = ma$
or $T = W - ma$
(ج)



a الى أعلى
$T - W = ma$
or $T = ma + W$
(ب)



$a = 0$
$T = W$
(أ)

شكل (٧ - ١٣)
يظهر وزن الجسم الموجود فى مصعد مختلفا بالنسبة لشخص موجود فى نفس المصعد ، ويعتمد ذلك على حركة المصعد .

عندما يكون $a = 0$. وفى هذه الحالة يكون الشد فى الخيط ، هو W ، كذلك فإن الوزن الظاهرى للجسم أى قراءة الميزان ، يساوى وزنه الحقيقى W .

ويسود نفس هذا الموقف طالما كان $a = 0$. تحت هذا الشرط يكون $T = W$ ، ويكون الوزن الظاهرى مساويا للوزن الحقيقى . وحتى اذا كان المصعد متحركا الى أعلى أو الى أسفل بسرعة ثابتة فإن التسارع سيظل صفرا ويكون الوزن الظاهرى مساويا للوزن الحقيقى .

لنفحص الآن الموقف المبين فى الشكل ٧ – ١٣ جـ ، حيث تسارع المصعد الى أسفل فى هذه الحالة . بتطبيق قانون نيوتن الثانى كما سبق نجد أن:

$$W - T = ma$$

ومنه

$$T = W - ma$$

لاحظ أن الشد فى الخيط (وبالتالى قراءة الميزان) أصغر من W بمقدار ma . عندئذ سيبدو وزن الجسم أقل من W بالنسبة لمشاهد موجود فى المصعد المتسارع . الوزن الظاهرى للجسم فى هذه الحالة هو $W - ma$.

ويحدث أكثر المواقف اثارة عندما يسقط المصعد سقوطا ذاتيا ، أى عندما يتساوى تسارع المصعد مع تسارع الجاذبية ، $a = g$. وحيث أن $W = mg$ ، $a = g$ فى حالة السقوط الذاتى ، فإن الشد فى الخيط :

$$T = W - ma$$

يصبح

$$T = mg - mg = 0$$

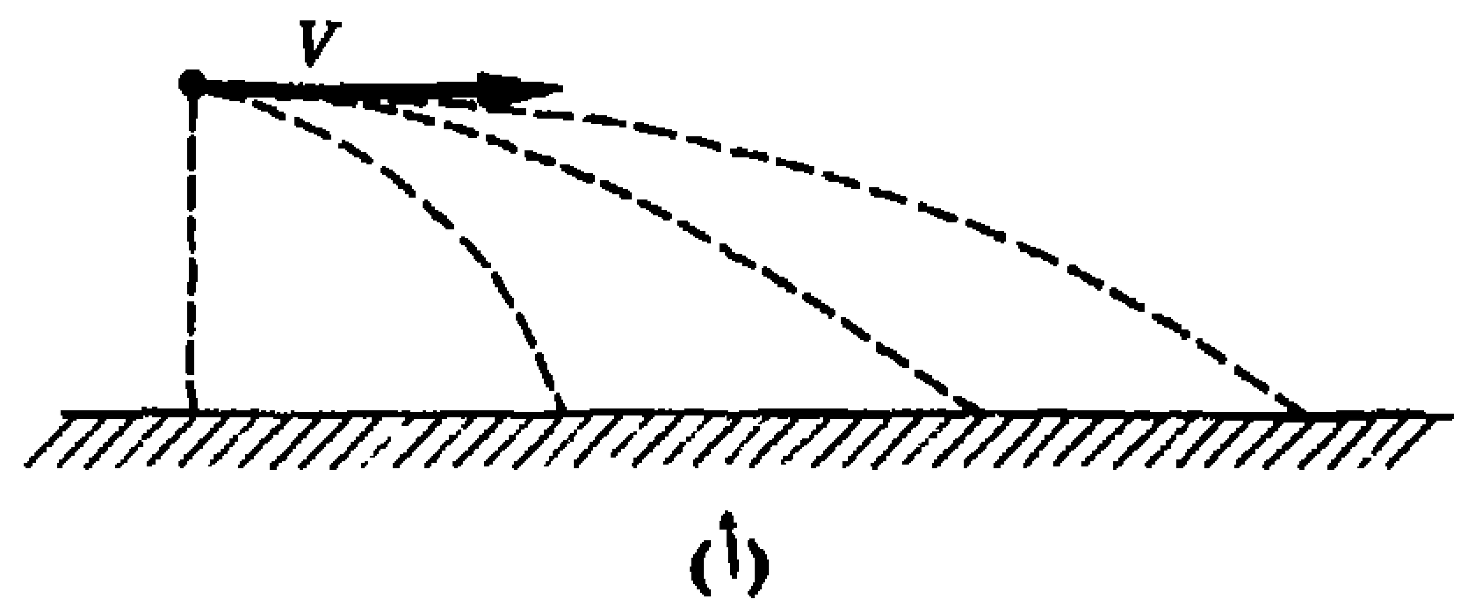
أى أن الجسم يبدو عديم الوزن فى المصعد الذى يسقط سقوطا ذاتيا ! واذا فكرنا فى ذلك قليلا فسيتضح أن هذا ليس بغريب فحيث أن المصعد (وكل شىء بداخله) يتسارع بنفس تسارع الجاذبية ، فمن تعريف مانقصده بالسقوط الذاتى ينتج أن من المستحيل وجود أى قوة تحمل الأجسام (المصعد وكل شىء بداخله) أو تعوق السقوط الذاتى بأى شكل من الأشكال . وعليه فإن جميع القوى الحاملة المؤثرة على المصعد وكل شىء بداخله لابد أن تساوى صفرا . لهذا فإن الشد فى الحبل الذى يحمل الجسم لابد أن يكون صفرا ، ونتيجة لذلك تبدو جميع الاجسام الموجودة داخل المصعد عديمة الوزن .

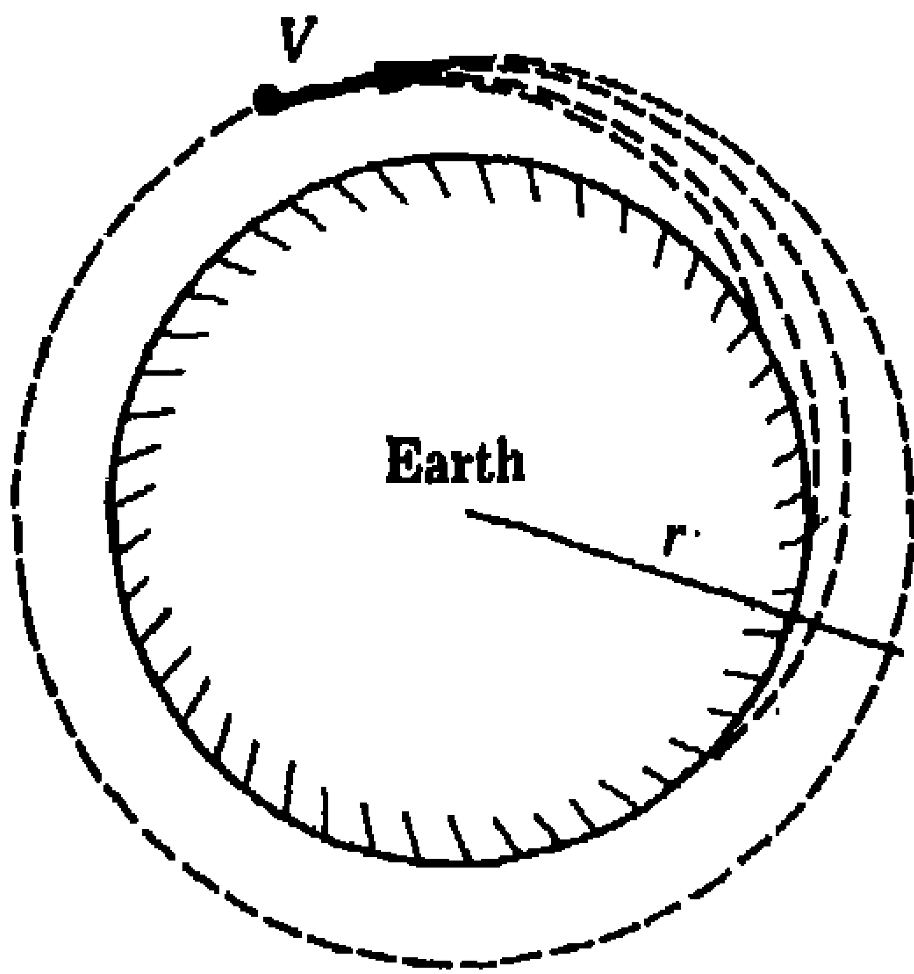
نرى من هذه الاعتبارات أن الوزن الظاهرى للاجسام فى الأنظمة المتسارعة ليس بالضرورة مساويا للوزن الحقيقى . وعلى وجه الخصوص فاذا

كان النظام يسقط سقوطا ذاتيا* فإن جميع القوى الحاملة يجب أن تكون صفرا وفى هذه الحالة تبدو جميع الاجسام عديمة الوزن . وهذا يعنى أنه طالما كانت سفينة الفضاء تسقط سقوطا ذاتيا فى الفضاء ، أى عندما لاتعمل المحركات الصاروخية ، فإن أى شيء بداخل هذا النظام الساقط سقوطا ذاتيا سيبدو عديم الوزن . ولايتعمد ذلك على مكان وجود الجسم أو على ما اذا كان ساقطا تحت تأثير قوة جذب الأرض أو الشمس أو أى نجم بعيد ، فطالما كانت السفينة ساقطة سقوطا ذاتيا فإن كل شيء بداخلها سيبدو عديم الوزن .

والتابع الأرضى أو القمرى هو ببساطة مثال لسفينة تسقط ذاتيا . وقد تدهشك هذه العبارة فى البداية ، ولكن من السهل اثبات صحتها . لنتأمل سلوك مقذوف اطلق فى اتجاه مواز لسطح الأرض فى غياب الاحتكاك الهوائى ، (عند ارتفاعات الاقمار الصناعية يكون الهواء رقيقا جدا بحيث يمكن اهماله) ، كما هو مبين فى شكل ٧ – ١٤ . فى الجزء أ يطلق المقذوف بسرعات متزايدة تدريجيا ، ويلاحظ من الشكل أن انحناء مسار المقذوف أثناء السقوط الذاتى يقل مع زيادة السرعة الأفقية . واذا أطلق الجسم بسرعة كافية فى اتجاه مواز للأرض فإن انحناء مسارها سيتطابق مع انحناء الأرض ، وهذا مبين فى الجزء ب . وفى هذه الحالة سوف يدور الجسم (سفينة الفضاء مثلا) ببساطة حول الأرض . وبالقرب من سطح الأرض ، أى على ارتفاع بضع مئات الأميال من سطح الأرض ، تصل هذه السرعة الحرجة الى حوالى 29,000 km/h ، وهذه هى سرعة دوران قمر صناعى أرضى . وفى هذه الحالة يتسارع القمر الصناعى طوال الوقت نحو مركز الأرض لأنه يدور حول الأرض . والتسارع النصف قطرى للتابع الأرضى هو ببساطة تسارع الجاذبية g' . وفى الحقيقة

شكل (٧ – ١٤)
اذا اطلق جسم بسرعة كافية فى اتجاه مواز لسطح الأرض فإنه سوف يدور حولها (وربما كان نيوتن أول من أدرك هذه الحقيقة) .





* تذكر أن الجسم الذى يسقط سقوطا ذاتيا هو ذلك الجسم الذى يقع تحت تأثير نوع واحد من القوى الخارجية غير المتزنة ، وهو الجذب التثاقلى للأرض أو الأجسام المشابهة .

فإن القمر الصناعى يسقط باستمرار تجاه مركز الأرض ، ولكن انحناء الأرض يمنعه من التصادم بها . وحيث أن القمر الصناعى هذا فى حالة سقوط ذاتى ، فإن جميع الاجسام بداخله تبدو عديمة الوزن .

وفى الحقيقة فإن المعادلات التى تحكم هذه الحركة بسيطة جدا . فلكى تتبع سفينة الفضاء مسارا دائريا لابد أن تجذبها القوة الجاذبة المركزية تجاه مركز الدائرة . وتنشأ هذه القوة نتيجة للجذب التثاقلى للأرض المؤثر على السفينة ، وبالتحديد :

$$F_G = G\frac{mM_{\text{earth}}}{r^2}$$

حيث m هى كتلة سفينة الفضاء، M_{earth} كتلة الأرض، r نصف قطر المدار . وبمساواة هذه القوة بالقوة الطاردة المركزية mv^2/r نجد أن :

$$G\frac{mM_{\text{earth}}}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

ومنه :

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\text{earth}}}{r}} \qquad (\text{٧} - \text{١٥})$$

ونرى من ذلك أن كتلة السفينة تشطب من الطرفين ، لذلك – كما وضحنا سابقا ، فإن السرعة التى تقذف بها السفينة ، أى سرعة دخولها فى المدار ، لاتعتمد على نوع المقذوف . وبالرغم من ذلك فإن السرعة اللازمه تقل بزيادة نصف قطر المدار كما تبين المعادلة السابقة .

ملخص :

تقاس الزاويا بالدرجة والدورة والزاوية النصف قطرية $1\text{ rev} = 360° = 2\pi\text{ rad}$. تمثل الزوايا بالرمز θ . يسمى معدل تغير θ بالنسبة للزمن بالسرعة الزاوية ω . التسارع الزاوى α هو معدل تغير ω بالنسبة للزمن .

كما فى الحركة الخطية ، هناك خمس معادلات للحركة الزاوية تطبق فى حالة ثبوت α هذه المعادلات هى :

$$\theta = \bar{\omega}t \qquad \alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \qquad \bar{\omega} = \tfrac{1}{2}(\omega_0 + \omega_f)$$

$$\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta \qquad \theta = \omega_0 t + \tfrac{1}{2}\alpha t^2$$

المعادلة الأولى تعرف متوسط السرعة الزاوية والمعادلة الثانية تعرف متوسط التسارع الزاوى .

عندما تدور عجلة حول محورها فإن أى نقطة على محيطها يمكن أن توصف بدلالة الكميات المماسية . المسافة المماسية التى تتحركها نقطة معنية على المحور s عندما تدور العجلة زاوية قدرها θ تعطى بالعلاقة $s = r\theta$ حيث r نصف قطر العجلة . بالمثل ، تعطى السرعة المماسية والتسارع المماسى لهذه النقطة بالعلاقتين .

$$v_T = r\omega \qquad a_T = r\alpha$$

فى جميع المعادلات التى تربط الكميات الزاوية بالكميات المماسية يجب استخدام الزاويا النصف قطرية لقياس الزاويا .

عندما تلف عجلة دائرة حول محورها خيطا على حافتها تعطى ازاحة وسرعة وتسارع أى نقطة على الخيط بالكميات المماسية s ، v_T ، a_T . بالمثل ، عندما تتدحرج عجلة على سطح مستو بدون انزلاق ، تعطى ازاحة وسرعة وتسارع مركز العجلة بالكميات المماسية s ، v_T ، a_T

لكى يتحرك الجسم فى مسار دائرى لابد من وجود القوة الجاذبة المركزية ، وهى القوة اللازمة لجذب الجسم من حركته المعتادة فى خط مستقيم . وتتغير السرعة الموجهة للجسم باستمرار عند حركته فى مسار دائرى . يقع الجسم تحت تأثير تسارع نصف قطرى موجه نحو مركز الدائرة . ويعطى هذا التسارع بالمقدار v^2/r . أما القوة الجاذبة المركزية التى تسبب هذا التسارع فتعطى بالمقدار mv^2/r .

القوة اللازمة لحمل الجسم لاتساوى دائما وزنه . وتسمى القوة اللازمة لحمل الجسم بوزنه الظاهرى . اذا كان الجسم وحامله متسارعين فإن الوزن والوزن الظاهرى يختلفان عادة . فى الحالة الخاصة بالسقوط الحر يساوى الوزن الظاهرى صفرا . نتيجة لذلك تبدو الأجسام عديمة الوزن عندما تسبح فى الفضاء . بالمثل ، حيث أن التابع الأرضى يسقط سقوطا حرا فإن الأجسام الموجودة بداخله تبدو عديمة الوزن .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – تحويل الزاوية المقاسة بالدرجة أو الزاوية النصف قطرية أو الدورة الى كل من الوحدات الأخرى .

٢ – استخدام العلاقة $\theta = \bar{\omega}t$ فى المواقف البسيطة التى تكون فيها اثنتان من الكميات الثلاث $(\theta, \bar{\omega}, t)$ معلومتين .

٣ – حساب التسارع الزاوى لعجلة عندما تكون الكميات ω_0 ، ω_f ، t معلومة .

٤ – كتابة المعادلات الخمس للحركة الزاوية وتعريف كل من الكميات الموجودة بها . ذكر الشرط الأساسى لتطبيقها .

٥ – استخدام معادلات الحركة الزاوية الخمس فى حل المسائل .

٦ – شرح العلاقة بين زاوية دوران عجلة θ والمسافة التى تتدحرجها العجلة أو طول الخيط الذى يلتف حولها . ايجاد θ أو s لعجلة معلوم نصف قطرها اذا كانت احدى الكميتين السابقتين معلومة .

٧ – شرح الفرق بين السرعة المماسية والسرعة الزاوية . حساب احدى هاتين الكميتين لعجلة نصف قطرها معلوم اذا كانت الأخرى معلومة . شرح مدى أهمية السرعة المماسية بالنسبة الى عجلة متدحرجة وبالنسبة الى عجلة تلف شيئا ما على حافتها .

٨ – شرح ماذا نعنى بالقوة الجاذبة المركزية ولماذا يجب توفيرها للجسم اذا أريد له أن يتبع مسارا دائريا . ذكر علاقة القوة الجاذبة المركزية والقدرة على استخدامها فى المواقف البسيطة التى يتحرك فيها الجسم فى دائرة أفقية أو رأسية .

٩ – إثبات أن الجسم الذى يتحرك فى مسار دائرى يتسارع باستمرار بالرغم من أن سرعته الزاوية ثابتة وذلك باستخدام الرسم التخطيطى . ذكر اتجاه ومقدار التسارع النصف قطرى .

١٠ – حساب القوة الحاملة التى تؤثر على جسم معلوم الكتلة اذا كان هذا الجسم متحركا بسرعة ثابتة ، متسارعا الى أعلى ، متسارعا الى أسفل . شرح معنى الوزن الظاهرى فى هذه الظروف ولماذا يختلف عن وزن الجسم .

١١ – شرح لماذا يقال أن الجسم الذى يدور فى فلك حول الأرض (أو أى موقف آخر مشابه) يسقط سقوطا ذاتيا . توضيح لماذا تبدو الاجسام عديمة الوزن فى ظروف معينة باسلوبك الخاص .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

المقياس النصف قطرى

النظير الزاوى لكل من s ، v ، a

معادلات الحركة الزاوية الخمس

الكميات المماسية $s = r\theta,\ v_T = r\omega,\ a_T = r\alpha$

تسارع الجذب المركزى

القوة الجاذبة المركزية

بالرغم من أن الجسم يتحرك فى مسار دائرى بمعدل حركة ثابت فانه يتسارع .

الوزن الظاهرى وانعدام الوزن

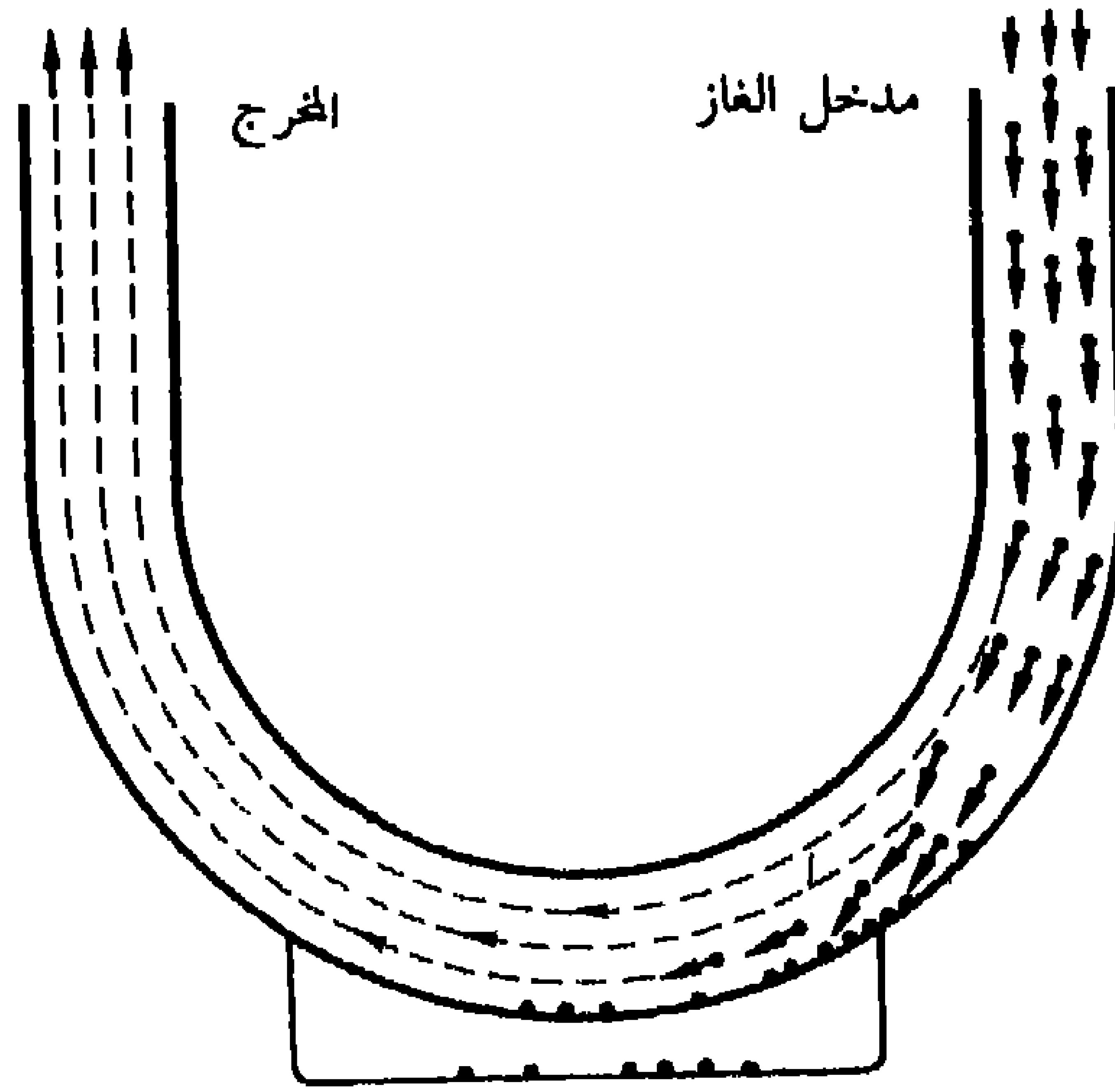
يسقط التابع الأرضى باستمرار نحو الأرض .

اسئلة وتخمينات

١ – تتبع الأرض مسارا دائريا تقريبا وتوجد الشمس فى مركز الدائرة.بفرض أن هذا صحيح تماما اشرح لماذا لايبذل الجذب التثاقلى للشمس المؤثرة على الأرض أى شغل ؟ ماذا تفعل قوة جذب الشمس للأرض ؟

٢ – فى أى اتجاه يطير الطين المتطاير من اطار الدراجة ؟ إشرح .

٣ – يمثل الشكل م ٧ – ١ نموذجا مبسطا لمزيل غبار من النوع الاعصارى ، وهو يستخدم على نطاق واسع لتنقية العودام الغازية الصناعية قبل اطلاقها الى الجو . ويتم ذلك بأن يدار الغاز بسرعة عالية فى مسار منحن فتتجمع دقائق الغبار عند الطرف الخارجى ثم تزال بالاستعانة برذاذ الماء أو بأية طريقة أخرى . اشرح المبدأ الذى بنيت على أساسه هذه الطريقة لإزالة مادة معينة من الهواء الملوث .



شكل (م ٧ – ١)

٤ – ناقش دورة التجفيف المغزلى فى الغسالة المنزلية الأوتوماتيكية .

٥ – عندما يقوم الطيار بالاعتدال من انقضاض حاد بطائرته فإنه يقع تحت تأثير قوة تبلغ عدة اضعاف قيمة g ، أى أن مقعد الطيار فى الطائرة يجب أن يدفع الطيار بقوة تساوى عدة اضعاف وزنه . ماهو سبب وجود هذه القوة ؟ واذا كان الإعتدال من الانقضاض سريعا جدا فإن الطيار يفقد وعيه مؤقتا . لماذا ؟

٦ – تستقر حشرة على عجلة مستوية ملساء يمكن أن تدور حول محور رأسى عمودى على مستوى العجلة ومار بمركزها . صف بطريقة كيفية حركة الحشرة عندما تبدأ العجلة فى الدوران . إفترض أن الحشرة قريبة جدا من المحور وأن هناك بعض الاحتكاك – ولكن ليس كبيرا – بين الحشرة والعجلة . (العجلة يمكن أن تكون القرص الدوار للحاكى – الفونوغراف – على سبيل المثال) .

٧ – يقال أن الشخص الموجود داخل تابع أرضى عديم الوزن . اشرح ماذا نعنى بذلك . لماذا لاتسقط الاجسام مقتربة من الأرض فى داخل السفينة بالرغم من وجودها تحت تأثير جذب الجاذبية الأرضية ؟

٨ – يمثل الشكل م ٧ – ٢ رسما تخيليا لمحطة فضائية دوارة لأحد الفنانين . بفرض أن الدوران يتم كما هو مبين . هل اختار الفنان الاتجاه « أعلى » الصحيح فى الكبسولة الفضائية عند A ؟ إشرح .

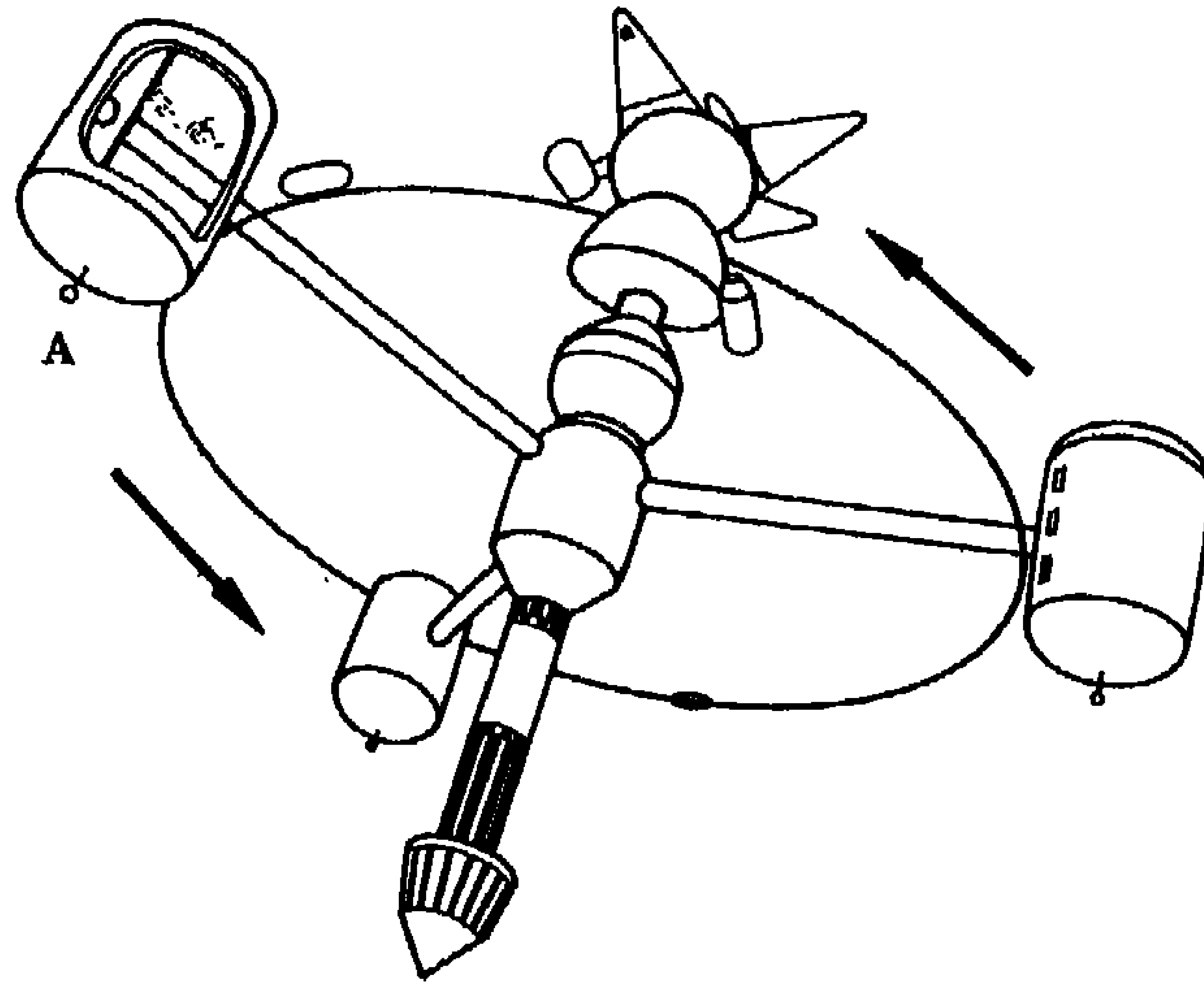
٩ – تزن سيدة نفسها يوميا على ميزان حمام زنبركى . افترض أن الأرض قد توقفت عن الدوران حول محورها . هل سيكون وزن هذه السيدة أكبر أو أقل أو مساويا لوزنها الحقيقى ؟ هل للمكان الذى تعيش فيه السيدة على الأرض أية أهمية فى هذا الشأن ؟

١٠ – تستقر بقة على قمة كرة بولينج مشمعة حديثا . ثم فقدت البقة رسوخ اقدامها فانزلقت على الكرة متجهة الى أسفل اشرح لماذا تترك البقة سطح الكرة قبل أن تسقط الى نصف الطريق الى أسفل .

١١ – قدر كتلة الأرض اذا علمت أن القمر يدور حولها فى مدار نصف قطره حوالى 3.8×10^8 m . (ق)

١٢ – بأى سرعة يجب أن تسير سيارة عند انحرافها من شارع الى آخر عمودى عليه . إفترض أن الشارعين مصنوعان من الخرسانة ومتوسطا الحجم وأن اتجاه المرور فى كليهما واحد . (ق)

١٣ – أثناء طيران أبوللو ١٣ الى القمر فى عام ١٩٧٠ حدثت مشكلة خطيرة عندما كانت السفينة فى منتصف الطريق تقريبا ثم عادت الى الأرض دون اكمال مهمتها . ومع ذلك فقد استمرت السفينة فى الحركة تجاه القمر ومرت عبر جانبه الآخر وعندئذ فقط عادت الى الأرض . لماذا لم يعد المشرفون على الرحلة السفينة ببساطة عند اتخاذ قرار اعادتها مباشرة بدلا من الاستمرار فى الرحلة تجاه القمر .



شكل (م ٧ – ٢)

مسائل

١ – عبر عن كل من الزوايا الآتية بالدرجات والدورات والزوايا النصف قطرية :
(أ) $250°$ ، (ب) 8.1 rad ، (جـ) 0.73 rev .

٢ – تدور بكرة مثبتة فى محور موتور بمعدل قدرة 1400 rev/min . ماهى سرعتها الزاوية (أ) بالزوايا النصف قطرية فى الثانية ، (ب) بالدرجات فى الثانية ؟

٣ – يحتاج عمود موتور كبير معين لزمن قدرة 20 s لكى يتسارع بانتظام من السكون الى سرعة التشغيل وقدرها 16 rev/s . اوجد (أ) التسارع الزاوى لعمود الموتور (بالدورات فى الثانية المربعة) ، (ب) عدد الدورات التى يدورها فى هذا الزمن .

٤ – ماهو التسارع الزاوى (بالزوايا النصف قطرية فى الثانية) الذى يجب أن تكتسبه عجلة لكى تتسارع من السكون الى سرعة دوران قدرها 520 rad/s بعد أن تكمل 7.5 rev ؟

٥ – الزمن اللازم لعجلة روليت معينة لكى تصل الى السكون هو 15 s فاذا كانت العجلة تدور 8.5 rev فى ذلك الزمن فبأى سرعة كانت تدور العجلة فى البداية ؟ (افترض أن التقاصر منتظم) .

٦ – توجد بقعة صغيرة من الغبار على بعد 5.0 cm من مركز اسطوانة حاكى تدور بمعدل قدره $33\ ^1/_3$ rev/min . (أ) ماهى السرعة التى تتحرك بها الاسطوانة بالزوايا النصف قطرية فى الثانية عندما يكون الحاكى دائرا ؟ (ب) بأى سرعة تتحرك بقعة الغبار بالسنتيمترات فى الثانية ؟

٧ – نصف قطر الأرض هو 6.37×10^6m . (أ) بأى سرعة (بالامتار فى الثانية) تتحرك شجرة عند خط الاستواء نتيجة لدوران الأرض ؟ (ب) وبأى سرعة (بالامتار فى الثانية) يتحرك دب قطبى عند القطب الشمالى ؟

٨ – عجلتان مسننتان معشقتان سويا نصفا قطريهما 0.50 cm و 0.15 cm . ما هو عدد الدورات التى يجب أن تدورها العجلة الصغيرة عندما تدور الكبيرة 3 rev ؟

٩ – تدور عجلة قطرها 2 in بسرعة قدرها 1800 rev/min. فإذا كان هناك خليط يلتف حول العجلة أثناء دورانها فما طول الخيط الذى يلفه العلجة فى زمن قدره 3 s ؟

١٠ – تسير مركبة فى طريق بمعدل قدرة 20 m/s . فإذا كان قطر عجلاتها 80 cm ، فما هى سرعة العجلات بالدورات فى الثانية والزوايا النصف قطرية فى الثانية والدرجات فى الثانية ؟

١١ – تبدأ سيارة قطر عجلاتها 80 cm الحركة من السكون وتتسارع بانتظام الى سرعة قدرها 15 m/s . ماعدد الدورات التى تدورها كل عجلة فى هذا الزمن ؟

١٢ – يتقاصر موتور دائر بمعدل 1800 rev/min بانتظام إلى السكون فى زمن قدره 15 s . (أ) اوجد تسارعه الزاوى وعدد الدورات التى يدورها قبل التوقف . (ب) واذا كان الموتور مجهزا بعجلة نصف قطرها 5 cm مثبتة فى عموده فما طول السير الذى تلفه العجلة فى الزمن اللازم للتوقف ؟

١٣ – ماهى القوة اللازمة لحفظ سيارة وزنها 3600 lb فى قوس نصف قطره 20 ft عندما تدور السيارة حولى ملتقى طريقين بسرعة قدرها 40 ft/s ؟

١٤ – فى احد العاب التسلية بالملاهى تدور العربات الصغيرة على سطح مستو فى نهاية قضبان طويلة . إفترض أن وزن العربة وشاغليها 2000 N وأن طول القضيب 3.0 m . ماهى القوة الشادة (الشد) التى يجب أن يتحملها القضيب عندما يدير العربة فى دائرة نصف قطرها 3.0 m بمعدل 1 rev فى 2 s ؟

١٥ – تقف حشرة كتلتها 3.0 mg على الحافة الملساء لأسطوانة حاكى نصف قطرها 25 cm ثم بدأت الأسطوانة فى الدوران من السكون لتصل إلى سرعة الدوران المعتادة وهى 45 rev/min . ماقيمة معامل الاحتكاك بين الحشرة والأسطوانة الضرورى لكى لاتنزلق الحشرة من فوق الأسطوانة ؟ (يمكن إهمال احتكاك الهواء نظرا لأن الحشرة مكتنزة جدا) .

١٦ – فى أحد أجهزة البحث العلمى تعرض شخص لتسارع قميته 5 g's ، أى خمس مرات قدر تسارع الجاذبية . وقد تحقق ذلك بادارة هذا الشخص فى دائرة أفقية بسرعة عالية جدا . وقد كان البعد بين مقعد هذا الشخص ومحور الدوران 20 ft . بأى سرعة يدور الشخص (بالدورات فى الثانية) إذا كانت القوة الجاذبة المركزية المؤثرة عليه خمس مرات قدر وزنه ؟

١٧ – من الحيل القديمة الشهيرة أن تحمل فى يدك سطلا من الماء وتديره فى دائرة رأسية ، فاذا كان معدل الدوران كبيرا بدرجة كافية فإن الماء لن يسقط من السطل عندما يكون السطل مقلوبا فى قمة المسار . ماهو الحد الأدنى لمعدل حركة يدك عند قمة الدائرة إذا أريد لهذه الحيلة أن تنجح ؟ إفترض أن طول يدك 0.60 m .

١٨ – عجلة فريس عبارة عن جهاز دائرى رأسى كبير يحمل الراكبين على مقاعد أفقية حول الدائرة الرأسية ، وقد كان نصف قطر احدى هذه العجلات 20 m. (أ) بأى سرعة (بالدورات فى الثانية) يجب أن تدور العجلة بحيث يدفع الراكب المقعد بقوة تساوى $1\frac{1}{2}$ قدر وزن الراكب عندما يكون الراكب فى قاع الدائرة ؟ (ب) بأى سرعة يجب أن تدور العجلة بحيث لايؤثر الراكب على المقعد بأى قوة عند قمة الدائرة ؟

١٩ — فى أحد نماذج ذرة الايدروجين (نموذج بوهر) يصور الالكترون كجسيم يدور حول النواة الموجبة للذرة فى مدار دائرى (نصف قطره 0.50×10^{-10} m) . وتنشأ القوة الجاذبة المركزية نتيجة للتجاذب الكهربائى بين النواة الموجبة والالكترون السالب . ماقيمة هذه القوة اذا كان الالكترون يتحرك بمعدل قدرة 2.3×10^{6} m/s ؟ (كتلة الالكترون 9.1×10^{-31} kg) .

٢٠ — استخدم قانون الجاذبية لحساب معدل حركة الأرض أثناء دورانها حول الشمس بفرض أن الأرض تسير فى مدار دائرى مركزه الشمس. ($M_{earth} = 6.0 \times 10^{24}$ kg ، $M_{sun} = 3.3 \times 10^{5}\, M_{earth}$ ،المسافة بين الأرض والشمس تساوى 1.5×10^{11} m) .

٢١ — يبدأ قرص أفقى فى الدوران من السكون حول محوره الرأسى بتسارع قدرة $0.50\ rev/s^2$. وبعد زمن قدرة 20 s انفصلت كتلة مقدارها 3.0 g كانت ملتصقة فى حافة العجلة . مامقدار القوة التى كانت تثبتها فى مكانها ؟ نصف قطر العجلة 40 cm .

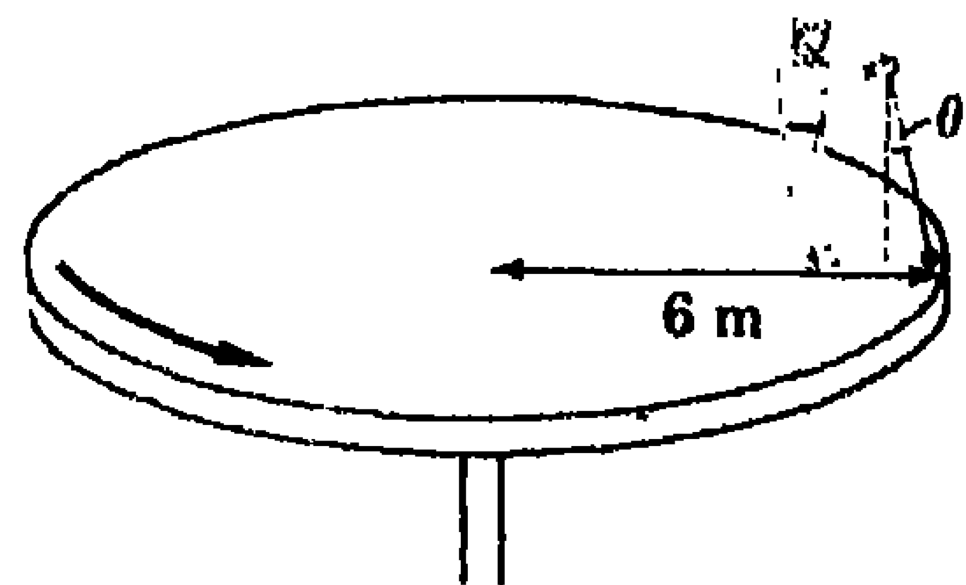
٢٢* — تتعلق كرة كتلتها 2.0 kg كبندول فى طرف حبل طوله 10.0 m-ازيح البندول جانبا بحيث صنع زاوية قدرها 37° مع الرأسى ثم أعتق . أوجد الشد فى الحبل (أ) بعد اعتاقة مباشرة ، (ب) عند مروره بأسفل نقطة فى مسار المرجحة .

٢٣ — لاختبار قوة المواد اللاصقة يستعمل جهاز مبنى على فكرة استخدام كتلة m ملصقة على حافة عجلة أفقية نصف قطرها b،اثبت أن القوة التى تستطيع المادة اللاصقة تحملها قبل انفصال الكتلة مباشرة تعطى بالعلاقة $F = 4\pi^2 n^2 bm$. ، حيث n سرعة العجلة بالدورات فى الثانية عند انفصال الكتلة .

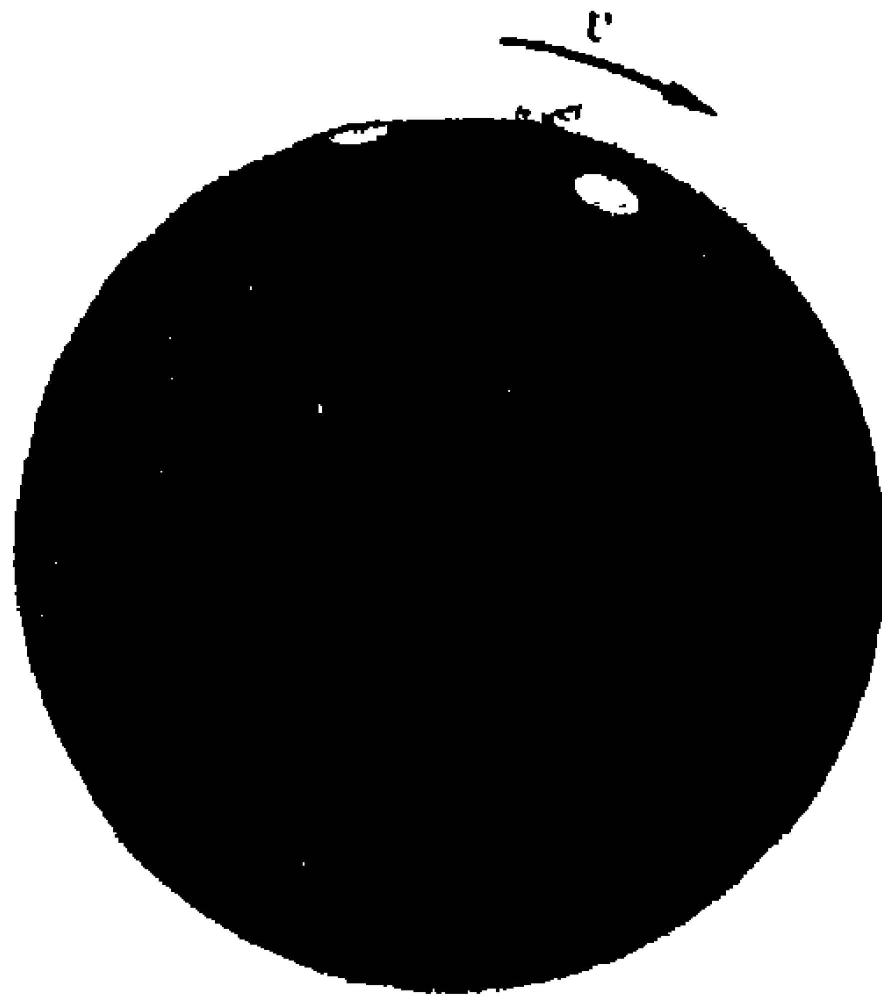
٢٤ — عند وجود التابع الأرضى فى مدار دائرى تتساوى قوة الجاذبية تماما مع القوة الجاذبة المركزية اللازمة . بأى سرعة (بالامتار فى الثانية) يجب أن يتحرك التابع الأرضى اذا كان نصف قطر مداره 7.00×10^{6} m أى 0.63×10^{6} m أو 400 mi فوق سطح الأرض ؟

٢٥* — يقف صبى على منصة دوارة ويمسك فى يده بندولا يقع على بعد نصف قطر قدره 6.0 m من مركز المنصة كما هو مبين فى الشكل م٧ — ٣. وقد وجد أن البندول يتعلق بحيث يصنع زاوية θ مع الرأسى عندما تكون سرعة دوران المنصة 0.020 rev/s . اوجد θ .

٢٦** — فقدت الحشرة المبينة بالشكل م ٧ — ٤ رسوخ أقدامها عندما كانت قريبة من قمة كرة البولينج فانزلقت على الكرة الى أسفل بدون احتكاك يذكر . اثبت أنها سوف تترك سطح الكرة عند الزاوية θ المبينة بالشكل ، حيث تعطى θ بالعلاقة $\cos\theta = \frac{2}{3}$.



شكل (م ٧ — ٣)



شكل (م ٧ — ٤)

الفصل الثـامــن

دوران الأجسام الجاسئة

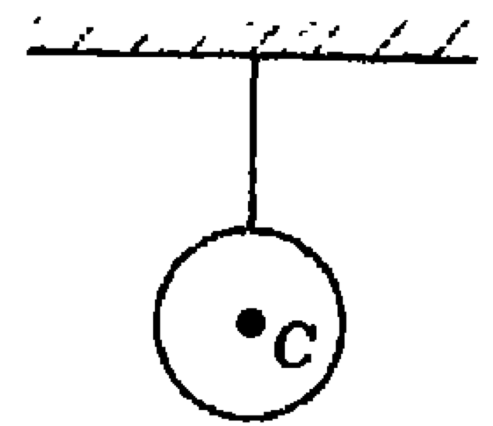
خصصت الفصول المختلفة السابقة لدراسة حركة الأجسام غير الدورانية . وبالرغم من أننا قد درسنا فى الفصل الأخير حركة الأجسام فى مسارات دائرية ، فإن الأجسام كانت صغيرة بدرجة كافية لأن نهمل حقيقة أن هذه الأجسام ذاتها قد تكون متحركة حركة تدويمية (أو مغزلية) . فى هذا الفصل سنتناول بالدراسة الحركة التدويمية للأجسام الكبيرة الجاسئة . وسنرى أن هناك نظيرا لقانون نيوتن الثانى ينطبق على دوران الأجسام ، وسنناقش أيضا مفهوم طاقة الحركة الدورانية وكمية التحرك الزاوى .*

* يمكن ضم الأجزاء من ٨ – أ الى ٨ – ٥ الى الفصل الأول اذا رأى المدرس ذلك . وتنتمى البنود ذات العلامة * والموجودة فى نهاية الفصل الى هذه الاجزاء .

٨ - ١ مركز الثقل ومركز الكتلة :

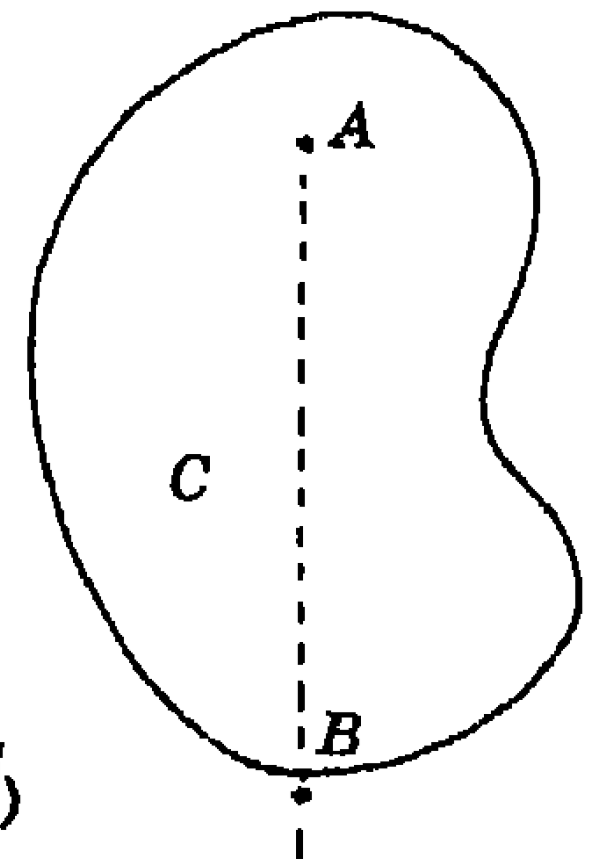
يمكن تحليل الحركتين الانتقالية والدورانية للأجسام الجاسئة ، أى غير القابلة للتشكيل أو التشويه ، وذلك بسهولة مع الاستعانة بمفهومى مركز الكتلة ومركز الثقل . يعرف مركز **ثقل الجسم** بأنه تلك النقطة الواحدة التى يمكننا اعتبار أن شد الجاذبية والوزن يؤثر عندها عند دراسة سلوك الجسم . وبإسلوب آخر ، يفضل فى كثير من الحالات ابدال الجسم الكبير بجسم صغير جدا (أو كتلة نقطية) وزنها هو نفس وزن الجسم . فمثلا ، اذا علقت كرة منتظمة فى خيط ، كما هو مبين الشكل ٨ - ١ ، يلاحظ أن النقطة المركزية للكرة توجد دائما تحت الخيط مباشرة . ونستنتج من ذلك أنه لكى نصف جذب الكرة للخيط فى مثل هذه التجربة يمكننا أن نعتبر أن وزن الكرة كله يؤثر عليها عند النقطة C ، أى مركز الكرة . وتسمى هذه النقطة مركز ثقل الكرة . واذا علق جسم فى حبل واحد يقع مركز الثقل تحت نقطة التعليق وعلى نفس خط الحبل . ومركز الثقل هو النقطة التى يمكننا أن نعتبر أن وزن الجسم يؤثر عليها .

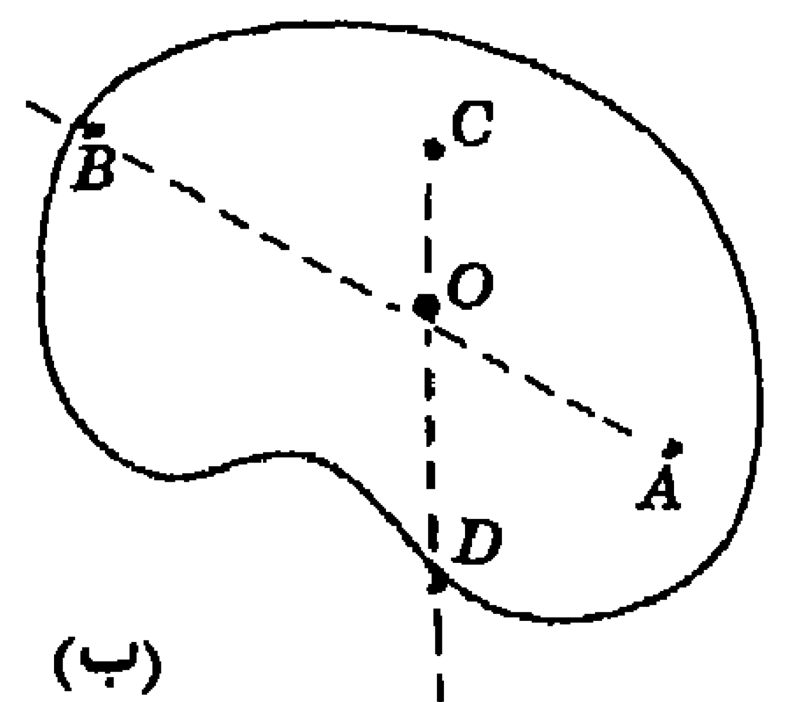
تعريف



شكل (٨ - ١)
يقع مركز ثقل الكرة C تحت نقطة التعليق مباشرة .

من السهولة بمكان ايجاد مركز ثقل الأجسام المتماثلة التى لها نقطة مركزية سهلة التعرف عليها . مثلا ، مركز ثقل مستطيل مسطح من ورق الكرتون هو مركزه الهندسى . وهذا صحيح أيضا بالنسبة للمكعب . ومع ذلك فليس من السهل إيجاد موضع مركز الثقل فى حالة الأجسام غير المنتظمة الشكل كصخرة مفلولة أو شخص مثلا . ولكننا نعرف من تعريف مركز الثقل ومن الشكل ٨ - ١ أن مركز ثقل الجسم الجاسىء يتعلق دائما تحت نقطة التعليق مباشرة . وهذه الحقيقة تزودنا بطريقة بسيطة لايجاد مركز الثقل . اعتبر مثلا جسما مسطحا غير منتظم الشكل كالمبين فى شكل ٨ - ٢ أ . فاذا وضع الجسم على محور ارتكاز لااحتكاكى عند A سيتعلق مركز الثقل تحت نقطة الدوران مباشرة فى مكان ما على الخط AB . واذ علقت الكتلة من نقطة جديدة كالنقطة C فإنها ستتعلق كما هو مبين فى الشكل ٨ - ٢ ب . وفى هذه الحالة لابد أن يقع مركز الثقل فى مكان ما على الخط CD .



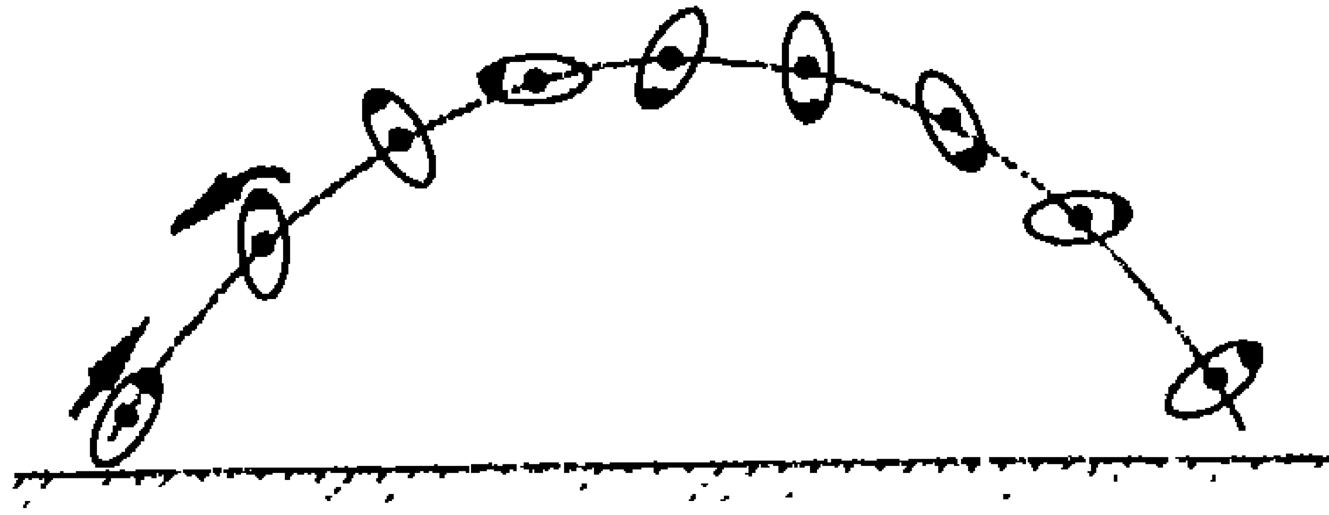


شكل (٨ - ٢)
بعد تعيين المطمارين (أى الخطين الرأسيين) AB و CD بتعليق الجسم من النقطتين A و C ، نعرف أن مركز الثقل يقع عند نقطة تقاطع الخطين O .

وحيث أن مركز الثقل لابد أن يقع على الخطين AB و CD ، فانه يجب أن يقع عند تقاطع هذين الخطين ، وبالتحديد عند النقطة O . واذا علق الجسم من نقطة دوران مختلفة فان O ستقع كذلك تحت نقطة الدوران مباشرة . هذه اذن هى طريقة عملية بسيطة لايجاد موضع مركز ثقل الجسم الجاسىء . وطالما وجد الجسم فى مجال جاذبية منتظم فإن مركز الثقل يتطابق مع نقطة هامة أخرى هى مركز كتلة الجسم .

وسوف نستخدم مركز الكتلة لأن له خاصية فى غاية الأهمية .

عند دراسة الحركة الانتقالية لجسم غير نقطى تحت تأثير قوى خارجية ، يمكننا أن نفترض أن كتلة الجسم بأكملها موجودة فى مركز كتلته .



شكل (٨ – ٣)
يتبع مركز الكتلة نفس المسار الذى يجب أن تتبعه كتلة نقطية تقع تحت تأثير نفس القوى الخارجية .

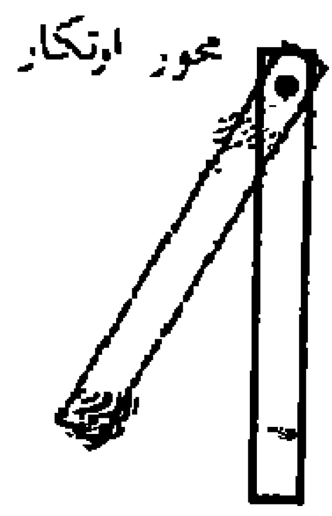
وهذا يعنى أن الجسم الجاسىء يكافىء كتلة نقطية مساوية موجودة فى مركز الكتلة طالما كنا نهتم بالحركة الإنتقالية للجسم تحت تأثير قوة خارجية . لنعتبر مثلا المقذوف الدائر المبين فى الشكل ٨ – ٣ . فى هذه الحالة يتبع مركز الكتلة المنحنى الأملس المبين وهو نفس المنحنى الذى يجب أن يتبعه جسم صغير يقع تحت تأثير نفس القوى الخارجية . وكما سنرى فيما بعد ، تكمن أهمية مركز الكتلة فى حقيقة أنه يسمح لنا بفصل الحركة الانتقالية والحركة الدورانية للجسم . وتتم الحركة الإنتقالية للجسم كما لو كانت كتلته مركزه بأكملها فى مركز كتلته .

٨ – ٢ عزم الدوران والشرط الثانى للتوازن

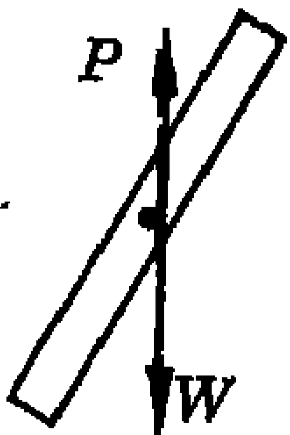
لندرس الآن الشرط اللازم لكى يمنع الجسم من الدوران . نذكر أننا قد ناقشنا فى الفصل الأول الشروط اللازمة لكى يكون الجسم فى حالة توازن بشرط اهمال جميع التأثيرات الدورانية . وقد استنتجنا أن المجموع الإتجاهى لجميع القوى المؤثرة على الجسم يجب أن يكون صفرا لكى يكون الجسم فى حالة توازن . وقد لخصنا ذلك فى الشرط الأول للتوازن ، وهو بالتحديد $\Sigma \mathbf{F} = 0$ ، أو :

$$\Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$$

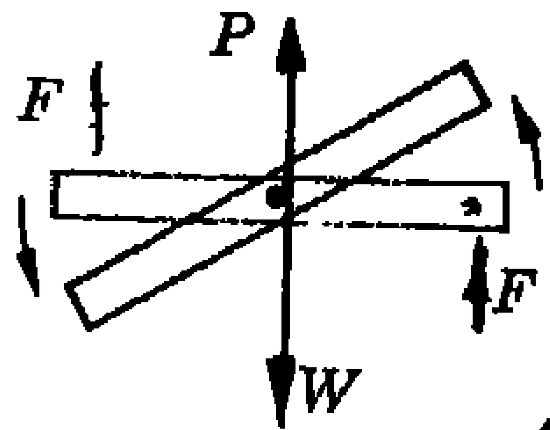
وسنوجد الآن الشرط اللازم تحققه لكى يكون الجسم فى حالة توازن دورانى



(أ)



(ب)



(ج)

شكل (٨ – ٤)
تتعلق المسطرة المنتظمة فى الموضعين المبينين بالخطوط السوداء فى (أ) و (ب)-ومع ذلك فإن المسطرة ستدور فى عكس اتجاه عقارب الساعة فى (جـ) .

اعتبر تجربة بسيطة جدا . اثقب ثقبين فى مسطرة طولها متر أو ياردة بحيث يكون أحدها مارا بمركز المسطرة . والآن ضع مسمارا صغيرا فى الثقب البعيد عن المركز واستعمله كنقطة دوران كما هو مبين فى الشكل ٨ – ٤ أ .

من خبرتنا العامة نعلم أن المسطرة لن تتعلق ساكنة صانعة زاوية معينة مع الرأس كما هو مبين فى الشكل ٨ – ٤ أ ، ولكنها سوف تسقط لتتخذ عند السكون وضعا رأسيا بحيث يقع مركز الثقل تحت نقطة الدوران كما هو مبين فى الشكل . من ناحية

أخرى ، اذا كانت نقطة الدوران فى المركز بالضبط ، كما هو مبين فى الشكل ٨ — ٤ ب ، فإن المسطرة ستظل ساكنة بأى زاوية نضع المسطرة بها ، فى الوضع المبين فى الجزء ب مثلا . وهذا متوقع لأن مركز الثقل يتطابق مع نقطة الدوران . وتؤثر على المسطرة قوتان فقط هما جذب الجاذبية الى أسفل ودفع محور الإرتكاز الى أعلى. وعندما تكون المسطرة فى حالة السكون لابد أن تكون هاتان القوتان متساويتين فى المقدار لأن $\Sigma F_y = 0$ فى حالة التوازن .

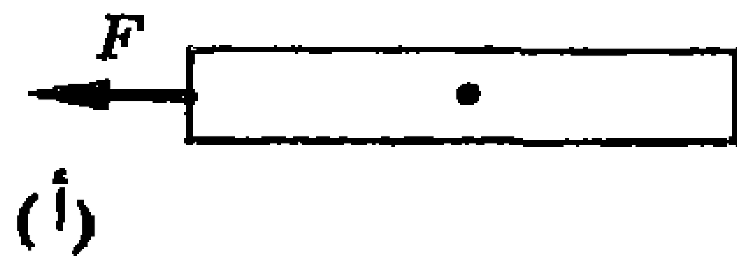
اعتبر الآن ماسوف يحدث اذا أثرت قوتان F متساويتان فى المقدار ومتضادتين فى الاتجاه على المسطرة كما هو مبين فى الشكل ٨ — ٤ جـ . لاحظ أن الشرط الأول للتوازن لازال متحققا ، لأن $\Sigma F_y = 0$ ولأنه لاتؤثر على المسطرة أى قوة فى الاتجاهين x أو z . ولكن الخبرة تبين لنا أن المسطرة لن تستمر الآن فى حالة السكون وأنها سوف تبدأ فى الدوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة كما هو موضح فى الشكل . يتضح لنا من ذلك أن الجسم لايوجد فى حالة توازن بالرغم من تحقق الشرط الأول للتوازن . لابد إذن من وجود شرط ثان للتوازن ، وهو ماسنناقشه الآن .

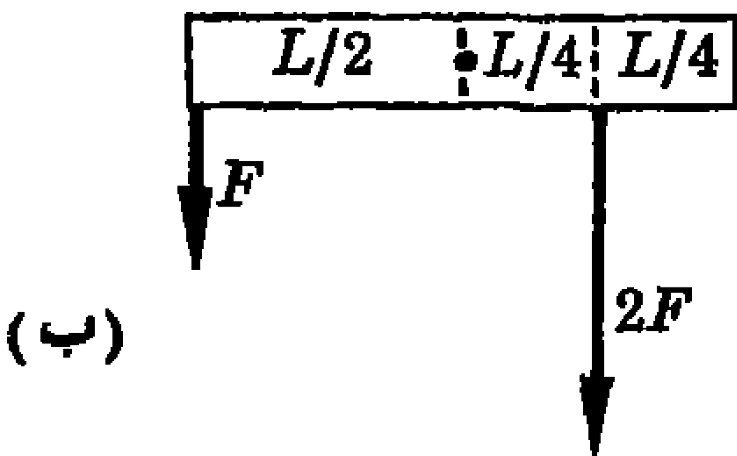
يبين لنا المثال السابق أنه لكى يوجد الجسم فى حالة توازن لايكفى أن يكون $\Sigma F_x = 0$ ، $\Sigma F_y = 0$ ، $\Sigma F_z = 0$ ، ولكن بالاضافة الى ذلك لايجب أن يكون هناك أى تأثير دورانى محصل للقوى التى تحاول ادارة الجسم . لنفحص الآن التأثيرات الدورانية بتفصيل أكثر حتى يمكننا صياغة الشرط الثانى للتوازن بدقة أكبر . لتحقيق ذلك اعتبر المواقف المبينة فى الشكل ٨ — ٥ أ ، ب ، جـ بحيث ترتكز المسطرة على محور الإرتكاز عند مركزها فى كل حالة .

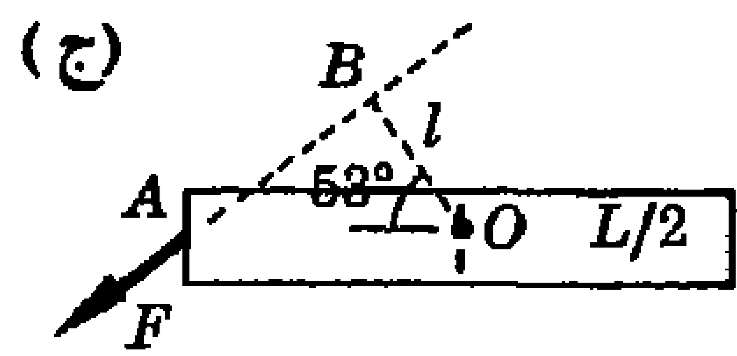
اذا جذبنا المسطرة فى خط مستقيم معها كما فى الجزء أ سيتبين لنا أن المسطرة تستمر فى حالة السكون ، وعليه فليس للقوة F فى هذه الحالة أى تأثيرات دورانية . من ناحية أخرى ، فى ترتيبة من النوع المتأرجح كالمبينة فى الجزء ب تحاول القوة F أن تدير المسطرة فى عكس اتجاه عقارب الساعة . ولكى نمنعها من ذلك يمكننا أن نسلط قوة على الجانب الآخر للمسطرة . وتبين التجارب الدقيقة أن القوة F المؤثرة على طرف الأرجوحة يمكن أن تتزن مع قوة أخرى تساوى ضعفها مؤثرة على الجانب الآخر من الأرجوحة كما هو مبين بالشكل . وعندئذ تتزن القوة $2F$ التى تحاول ادارة المسطرة حول نقطة الدوران فى اتجاه عقارب الساعة تماما مع القوة F التى تحاول ادارةالمسطرة فى عكس اتجاه عقارب الساعة . لاحظ أن حاصل ضرب القوة F فى بعدها عن محور الارتكاز $L/2$ تساوى تماما حاصل الضرب $(2F)(L/4)$ بالنسبة للقوة الأخرى .

يمثل الشكل ٨ – ٥ جـ مثالا ثالثا لقوة تدير المسطرة فى عكس اتجاه عقارب الساعة أيضا . وقد وجد من التجربة أن القوة المؤثرة فى الاتجاه المبين تسبب تأثيرا دورانيا أكبر مما فى الجزء أ وأقل من تأثير F فى الجزء ب . وفى الحقيقة تبين التجارب الكمية أن التأثير الدورانى لقوة حول نقطة الدوران تساوى حاصل ضرب القوة فى المسافة التى تسمى ذراع الرافعة . **وذراع الرافعة هو العمود الساقط من المحور ،** أو نقطة الارتكاز ، على خط القوة ، وهو الطول OB فى الشكل ٨ – ٥ جـ ويسمى التأثير الدورانى **بعزم الدوران** . والتعريف الدقيق لعزم الدوران هو : **تعريف**

(ذراع الرافعة) (القوة) = عزم الدوران (٨ – ١) **عزم الدوران**







شكل (٨ – ٥)
ليس هناك أى تأثير دورانى محصل على القضيب المرتكز على محور عند مركزه حتى عند وجود القوى المبينة فى (أ) ، (ب) . عزم الدوران ، أو التأثير الدورانى ، فى (جـ) يساوى القوة F مضروبة فى الطول OB .

وبالرموز

$$\tau = Fl$$

حيث يمثل الرمز τ (تاو) عزم الدوران*

مثال توضيحى ٨ – ١ : اوجد ذراع الرافعة فى الشكل ٨ – ٥ أ ، ب ، جـ .

طريقة الحل : ذراع الرافعة فى الشكل ٨ – ٥ أ يساوى صفر لأن خط القوة يمر بالمحور . اذن التأثير الدورانى ، أو عزم الدوران ، يساوى صفرا فى هذه الحالة لأن :

$$\tau = (F)(0) = 0$$

فى الجزء ب ذراع الرافعة للقوة F هو $L/2$. وعليه فإن عزمها الدورانى ، أو تأثيرها الدورانى ، هو :

$$\tau = F\frac{L}{2} = \tfrac{1}{2}FL \quad \text{عكس اتجاه عقارب الساعة}$$

لاحظ أن العزم الدورانى نتيجة للقوة $2F$ هو :

$$\tau = (2F)(\tfrac{1}{4}L) = \tfrac{1}{2}FL \quad \text{فى اتجاه عقارب الساعة}$$

وفى هذه الحالة على الأقل يتحقق التوازن اذا كان عزم الدوران فى اتجاه عقارب الساعة مساويا لعزم الدوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة .

يمثل الشكل ٨ – ٥ جـ حالة أكثر تعقيدا فى ايجاد ذراع الرافعة . فى هذه الحالة خط القوة هو ذلك الخط الذى يمثل $\overline{AB}$ جزءا منه ، والعمود الساقط من المحور O على هذا الخط هو $\overline{OB}$. اذن – من التعريف $\overline{OB}$ هو ذراع الرافعة . وحيث أن :

---

* لاحظ أن وحدات عزم الدوران هى القوة فى المسافة . ولكن هذه هى أيضا وحدات الشغل . ومع ذلك فإن مفهوم الشغل وعزم الدوران مختلفين تماما .

$$\cos 53° = \frac{\overline{OB}}{L/2}$$

ومن الواضح أن ذراع الرافعة فى هذه الحالة هو :

$$\overline{OB} = (0.60)\left(\frac{L}{2}\right) = 0.30L$$

وبهذا فإن عزم الدوران هو :

$$\tau = (F)(0.30L) = 0.30FL$$

لاحظ ، كما قلنا سابقا ، أن عزم الدوران ، أو التأثير الدورانى ، فى هذه الحالة وسط فى المقدار اذا قورن بالشكلين الآخرين .

لنستعرض هنا ماتعلمناه حتى الآن . عزم الدوران أو التأثير الدورانى ، لقوة ما بالنسبة لمحور ، أو نقطة دوران ، يساوى حاصل ضرب القوة فى ذراع رافعتها . ذراع الرافعة هو طول العمود الساقط من المحور على خط القوة .

لدينا الآن مايكفى من المعلومات لكى نضع صيغة دقيقة للشرط الثانى (والأخير) للتوازن . تبين التجارب الدقيقة أنه لكى لايحدث دوران،يجب أن تكون عزوم الدوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة . ويمكن كتابة هذا الشرط فى صورة معادلة بسيطة اذا اعتبرنا أن عزوم الدوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة موجبة وعزوم الدوران فى اتجاه عقارب الساعة سالبة (أو العكس لأنه لافرق بين هذا وذاك لأغراض دراستنا) . اذن ، باستعمال التدوين $\Sigma\tau$ الذى يعنى « مجموع جميع عزوم الدوران » يمكننا كتابة الشرط الثانى للتوازن على الصورة :

الشرط الثانى للتوازن

$$\Sigma\tau = 0$$

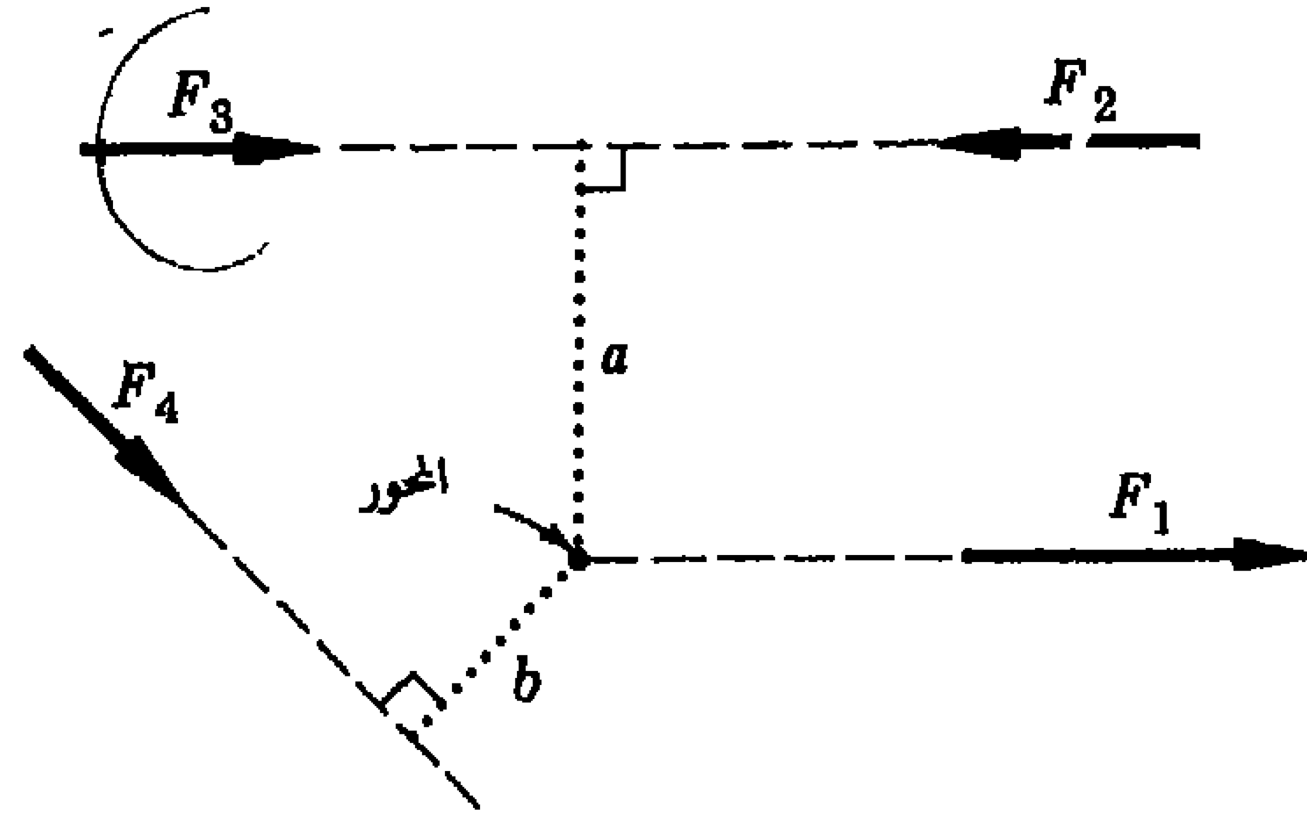
فرضنا ضمنيا فى هذه المناقشة لعزوم الدوران أن حركة الجسم المعنى مقصورة على مستوى واحد ، وفى الحقيقة فإن كثيرا من الحالات الهامة تنتمى الى هذا النوع .

شرط التوازن

والآن أصبحت جميع الشروط اللازمة لتوازن الجسم معلومة . وتتلخص شروط التوازن – فى بعدين – بالعلاقات التالية :

$$\Sigma F_x = 0 \qquad \Sigma F_y = 0 \qquad \Sigma\tau = 0 \qquad (٢ - ٨)$$

شكل (٨ - ٦)
اوجد ذراع الرافعة لكل قوة بالنسبة للمحور المبين



وقبل أن نترك هذا الجزء يجدر بنا أن نشير الى ان مصطلح **العزم أو عزم القوة** تستعمل فى بعض الأحيان بدلا من عزم الدوران . وفى هذه الحالة يشار الى ذراع الرافعة **بذراع العزم** . وبالطبع فإن المفاهيم تظل واحدة .

مثال توضيحى ٨ - ٢ : اوجد ذراع الرافعة لكل من القوى الموضحة فى شكل ٨ - ٦ حول نقطة المحور المبينة .

طريقة الحل : يمثل ذراع الرافعة فى كل حالة بخط منقط . لاحظ أنه طول العمود الساقط من المحور على خط القوة . اذن :

القوة	ذراع الرافعة	عزم الدوران
F_1	0	0
F_2	a	$+aF_2$
F_3	a	$-aF_3$
F_4	b	$+bF_4$

لاحظ أيضا أن عزم الدوران الناتج من القوتين F_2 ، F_4 فى عكس اتجاه عقارب الساعة ، بينما يلاحظ أن عزم الدوران الناتج من F_3 فى اتجاه عقارب الساعة . وفى الحالات النموذجية تكون وحدات القوة النيوتن - متر أو الباوند - قدم .

٨ - ٣ توازن الأجسام الجاسئة :

حيث أننا نعلم الآن الشرط الثانى للتوازن يمكننا معالجة جميع المواقف التى يكون الجسم الجاسىء فيها فى حالة توازن . لتحليل مثل هذه المواقف يجب علينا أن نتبع الطريقة المذكورة فى الفصل الأول ، ولعلك تذكر أن هذه الطريقة تتضمن الخطوات الخمس الأساسية التالية :

١ - اعزل الجسم المراد دراسته .
٢ - ارسم القوى المؤثرة على الجسم .
٣ - حلل القوى الى مركباتها .

٤ — اكتب المعادلات $\Sigma\tau = 0$ ، $\Sigma F_y = 0$ ، $\Sigma F_x = 0$.
٥ — حل المعادلات بالنسبة للمجاهيل .

لنوضح هذه الطريقة باستخدام المثال الآتى :

مثال توضيحى ٨ — ٣ : اعتبر رسام الاشارات المبين فى الشكل ٨ — ٧ والذى يقف على لوح خشبى ثخين وزنه 50 lb معلق بحبلين . إوجد الشد فى كل حبل إذا كان وزن الرسام 150 lb .

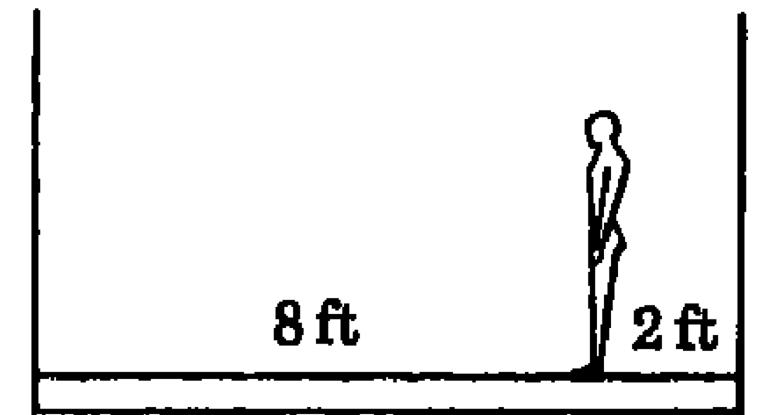
طريقة الحل : يعزل اللوح الخشبى الثخين كجسم فى حالة توازن . القوى المؤثرة عليه موضحة فى الجزء ب من الشكل ٨ — ٧ . وحيث أن جميع القوى تؤثر فى الإتجاه y فإن العلاقة $\Sigma F_y = 0$ تصبح :

$$T_1 + T_2 - 50 - 150 = 0$$

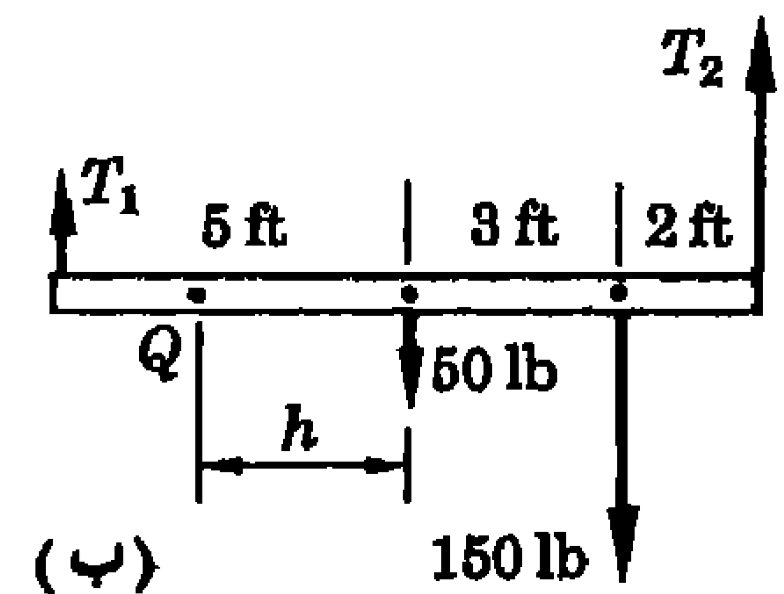
وقد حذفنا الوحدات من هذه المعادلة للتبسيط ، ولكن يمكنك التحقق من الوحدات المستخدمة فى هذه المعادلة بالاستعانة بالمعادلات التى كتبت فيها الوحدات . ولكتابة معادلة عزم الدوران يجب علينا أولا أن نختار نقطة الدوران أو المحور ، وسوف نناقش مسألة اختيار المحور أو نقطة الدوران بالتفصيل فى الجزء التالى . ولكننا فى هذه الحالة سنختار مركز ثقل اللوح الخشبى ببساطة كمحور . عندئذ تأخذ المعادلة $\Sigma\tau = 0$ الصورة :

$$(T_2)(5.0) - (150)(3.0) - (T_1)(5.0) = 0 \qquad (٨ - ٣)$$

وبحل هاتين المعادلتين آنيا سنجد أن $T_1 = 55$ lb و $T_2 = 145$ lb



(أ)



(ب)

شكل (٨ — ٧)
يراد ايجاد الشد فى كل من الحبلين اللذين يحملان لوحا خشبيا ثخينا وزنه 50 lb يقف عليه رجل وزنه 150 lb . القوى المؤثرة على اللوح الخشبى مبينة فى (ب) .

٨ — ٤ موضع المحور اختيارى

افترضنا ضمنيا فى المثال السابق أن محور كتابة معادلة عزم الدوران يمكن أن يؤخذ عند مركز ثقل اللوح الخشبى . وبالرغم من أنه من الممكن إثبات صحة هذا الفرض عمليا ، فإن من غير الملائم إجراء تجربة عملية لتبرير اختيار المحور فى كل حالة قد تقابلنا . لذلك فإننا سنحاول أن نبرهن بطريقة عامة أين يباح لنا اختيار نقطة الدوران أو المحور لكتابة معادلة عزم الدوران .

لنتبين الآن ماإذا كانت النقطة Q فى الشكل ٨ — ٧ ب نقطة ممكنة لاختيار المحور . تبين التجارب الدقيقة أن مركز اللوح الخشبى نقطة ممكنة للمحور ، وبذلك يمكننا الاستفادة من هذه الحقيقة . لنكتب معادلة عزم الدوران بالنسبة للشكل ٨ — ٧ ب مؤقتا باستخدام Q كمحور . فى هذه الحالة :

$$(T_2)(5 + h) - (50)(h) - (150)(3 + h) - (T_1)(5 - h) \overset{?}{=} 0$$

حيث تبين علامة الاستفهام الموجودة فوق علامة التساوى أننا لسنا متأكدين فى هذه المرحلة مما اذا كان من المسموح أن نستخدم النقطة Q كمحور .

بتجميع الحدود نجد أن :

$$-(T_1)(5) - (150)(3) + (T_2)(5) + (h)(+T_1 + T_2 - 200) \overset{?}{=} 0 \quad (٨ - ٤)$$

ولكن الشرط الأول للتوازن يؤكد أن المعامل h فى هذه المعادلة يساوى صفرا ، لأن مجموع القوى الرأسية يجب أن يكون صفرا ، أى أن :

$$-T_1 - T_2 + 200 = 0$$

نجد اذن أن الحد الذى يحتوى على h فى المعادلة (٨ - ٤) يساوى صفرا مهما كانت قيمة h . وبهذا فإن h يمكن أن تساوى أى شيء . علاوة على ذلك ، حيث أن الحد الذى يحتوى على h فى المعادلة (٨ - ٤) يساوى صفرا ، فإن المعادلة المؤقتة تصبح :

$$-(T_1)(5) - (150)(3) + (T_2)(5) \overset{?}{=} 0$$

ولكن هذه المعادلة هى بالضبط المعادلة (٨ - ٣) التى نعلم مسبقا أنها صحيحة . يمكننا اذن أن نحذف علامة الاستفهام من هذه المعادلات وأن نستنتج أن من الممكن أن نأخذ أى نقطة Q على طول اللوح الخشبى كمحور . وفى الحقيقة فإن من الممكن أن نثبت بطريقة أكثر عمومية أن محور كتابة معادلة الدوران يمكن أن يؤخذ فى أى مكان وأنه اختيارى تماما . لدينا اذن التبرير الكافى لاختيار المحور فى أى مكان نرى أنه مناسب.

مثال توضيحى ٨ - ٤ : حيث أننا نعلم أن اختيار المحور مسألة اختيارية ، لنوجد الآن الشد فى كل من الحبلين فى الشكل ٨ - ٧ مرة أخرى .

طريقة الحل : من الممكن إيجاد الشد فى كل من الحبلين بطريقة أسهل مما فى الجزء السابق اذا اخترنا نهاية اللوح الخشبى المربوط فى الحبل ذى الشد T_1 كمحور . حيث أن خط القوة T_1 يمر مباشرة بهذا المحور الجديد ، فإن ذراع الرافعة للقوة T_1 يساوى صفرا ، وعليه فإنها لاتسبب أى عزم دوران حول هذا المحور . نتيجة لذلك لن يظهر المجهول T_1 فى معادلة عزم الدوران .

وحيث أن عزم الدوران نتيجة للقوة T_1 يساوى صفرا فإن لدينا عزما دوران فقط فى اتجاه عقارب الساعة حول هذا المحور الجديد ؛ وهما بالتحديد العزمان الناتجان من

القوتين 50 lb و 150 lb . أما القوة T_2 فإنها تسبب عزم دوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة . وبكتابة معادلة عزم الدوران بالنسبة لهذا المحور الجديد :

$$\Sigma\tau = 0 \qquad (T_2)(10) - (50)(5) - (150)(8) = 0$$

وهذه المعادلة تعطينا T_2 مباشرة :

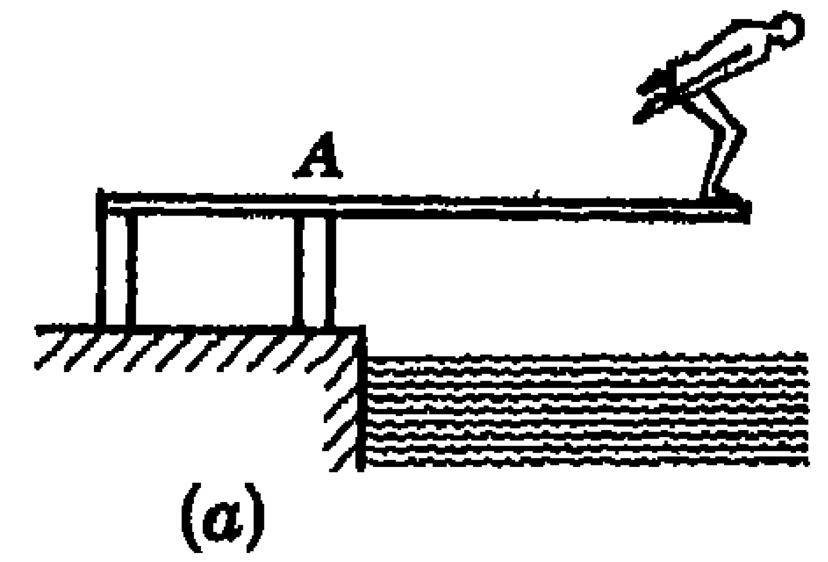
$$T_2 = 145 \text{ lb}$$

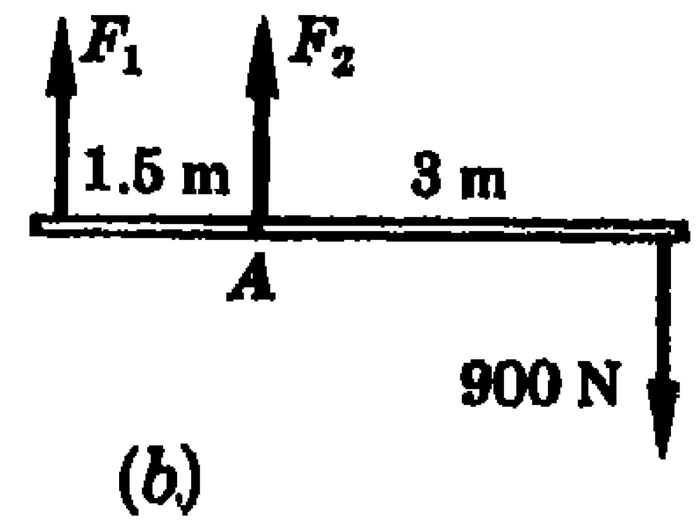
لاحظ أنه يمكننا الآن استخدام المعادلة الثانية $\Sigma F_v = 0$ لايجاد T_1 .

نرى من ذلك اذن أن اختيار المحور فى هذا المكان بالذات قد مكننا من تبسيط المعاملات الجبرية بدرجة كبيرة . وفى نفس الوقت وضحنا حقيقة أن المحور يمكن اختياره فى أى مكان مناسب .

وعموما سنختار المحور بحيث يمر خط أو أكثر من خطوط القوى المجهولة المؤثرة على الجسم خلال المحور ، وهذا يبسط الحسابات .

يمكن تبسيط معادلة عزم الدوران بدرجة كبيرة باختيار نقطة المحور على خط قوة مجهولة . وعندئذ لن تظهر هذه القوة فى معادلة عزم الدوران .





شكل (٨ – ٨)
يقف رجل وزنه 900 N على طرف لوح قفز خفيف . ونحن نخمن خطأ أن القوتين اللتين يؤثر بهما القائمان على اللوح متجهة كما هو مبين .

مثال توضيحى ٨ – ٥ : كما هو مبين فى الشكل ٨ – ٨ ، هناك رجل وزنه 900 N على وشك أن يقفز من لوح القفز . اوجد القوى التى يؤثر بها القائمان على اللوح الخشبى . افترض أن وزن القائم مهملا (900 N تساوى حوالى 200 lb) .

طريقة الحل : يعزل اللوح الخشبى وترسم القوى المؤثرة عليه كما هو مبين فى الجزء ب من الشكل . ولكن هناك خطأ فى الشكل وهو أننا قد رسمنا القوة F_1 فى الاتجاه غير الصحيح ، وهذا خطأ مقصود لنوضح كيف يؤثر ذلك على النتيجة . باختيار النقطة A كمحور ارتكاز نجد أن :

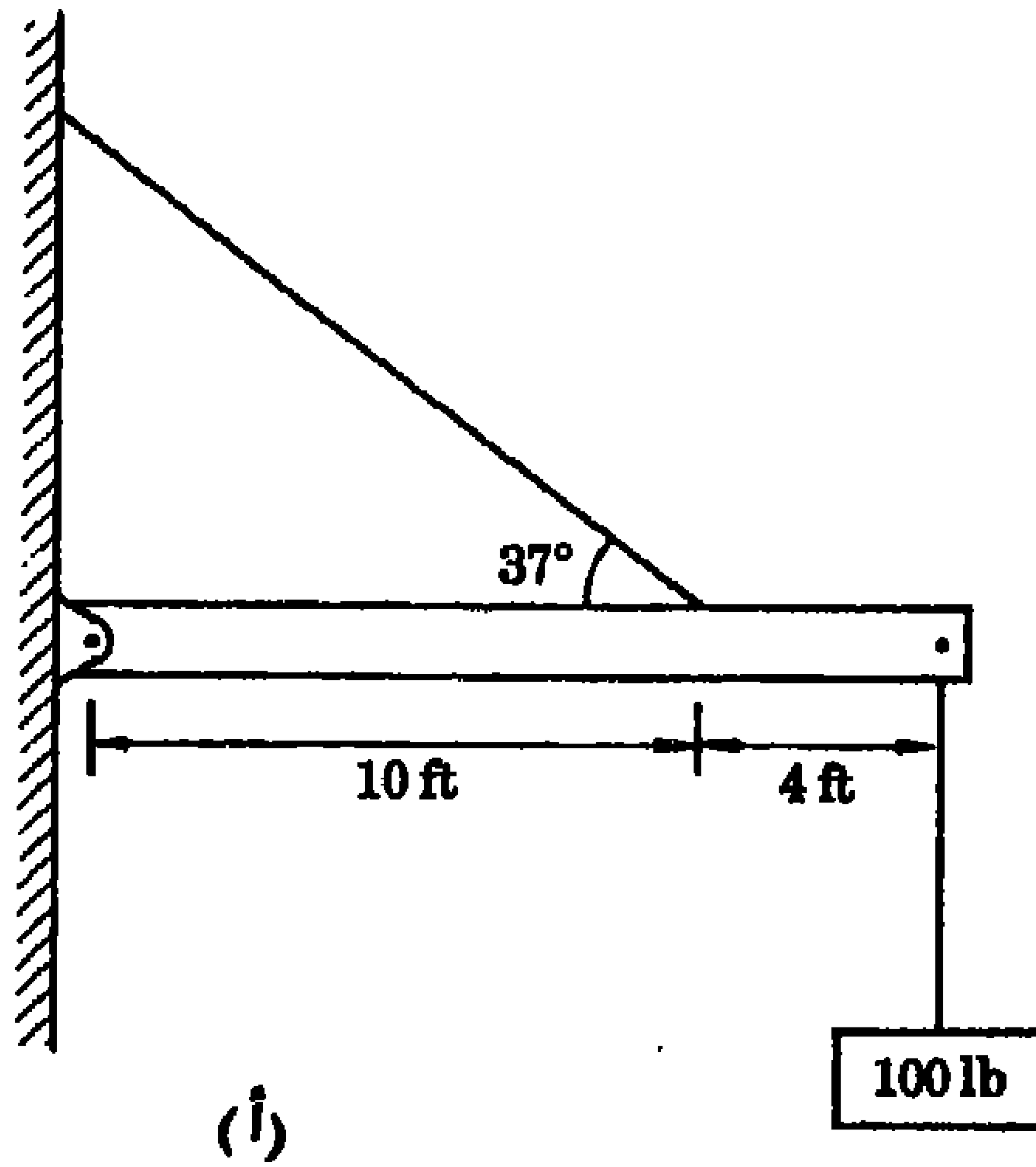
$$\Sigma\tau = 0: \qquad -(900)(3)-(F_1)(1.5) = 0$$
$$\Sigma F_v = 0: \qquad F_1 + F_2 - 900 = 0$$

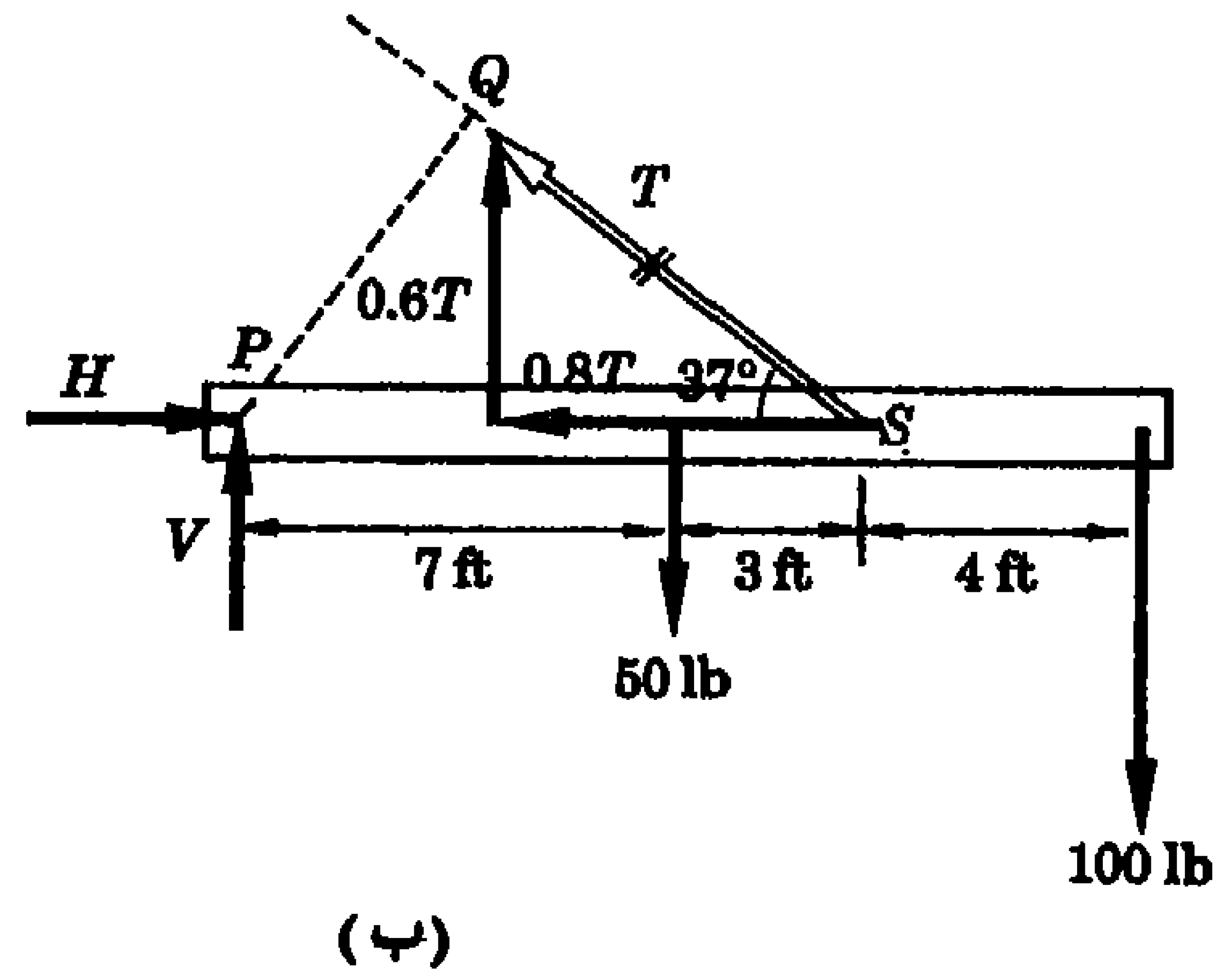
وبحل هاتين المعادلتين نحصل على $F_1 = -1800$ N ، $F_2 = 2700$ N . لاحظ أن الاشارة السالبة للقوة F_1 تبين لنا أن هذه القوة قد رسمت فى الإتجاه غير الصحيح وأن مقدارها هو 1800 N .

مثال توضيحى ٨ – ٦ : ماهو الشد فى الحبل الذى يحمل العمود المنتظم المبين فى الشكل ٨ – ٩ وماهما مركبتا القوة التى يؤثر بها الحائط على العمود إذا كان وزنه 50 lb ؟

طريقة الحل : يعزل العمود المطلوب دراسته وتمثل القوى المؤثرة عليه كما هو مبين فى الشكل ٨ – ٩ب . لاحظ أن وزن العمود وقدره 50 lb يؤثر عليه عند مركز ثقله . لاحظ كذلك أن الشد فى الحبل قد استبدل بمركبتيه . ويمكننا حذف مركبتى القوة عند الحائط وهى H و V بأخذ النقطة P كمحور . اذن :

شكل (٨ – ٩)
القوى المؤثرة على العمود فى (أ) مبينة بالتفصيل فى (ب) . لاحظ أن مركبة القوة $0.6T$ تجذب اللوح عند النقطة S ، ولهذا فإن ذراع رافعتها هو 10 ft .





$$\Sigma\tau = 0: \qquad (0.6T)(10) - (50)(7) - (100)(14) = 0$$
$$\Sigma F_x = 0: \qquad H - 0.8T = 0$$
$$\Sigma F_y = 0: \qquad V + 0.6T - 50 - 100 = 0$$

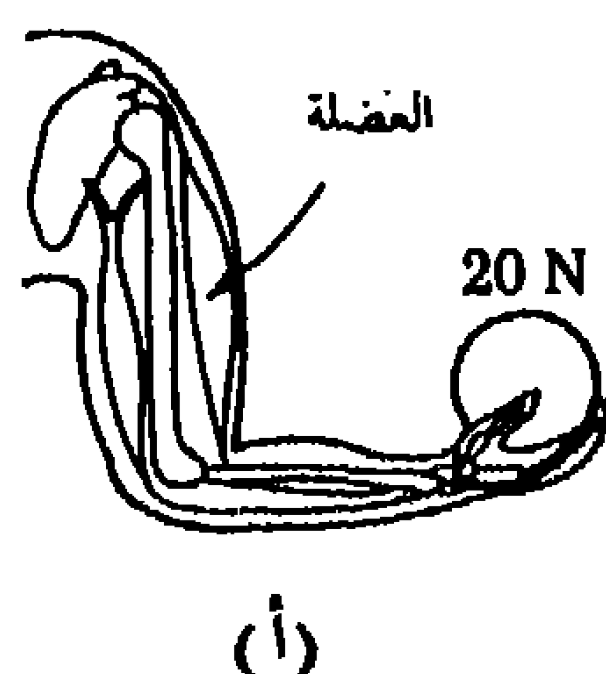
بحل المعادلة الأولى ، أى معادلة عزم الدوران ، بالنسبة الى T والتعويض فى المعادلتين الأخرتين نحصل على :

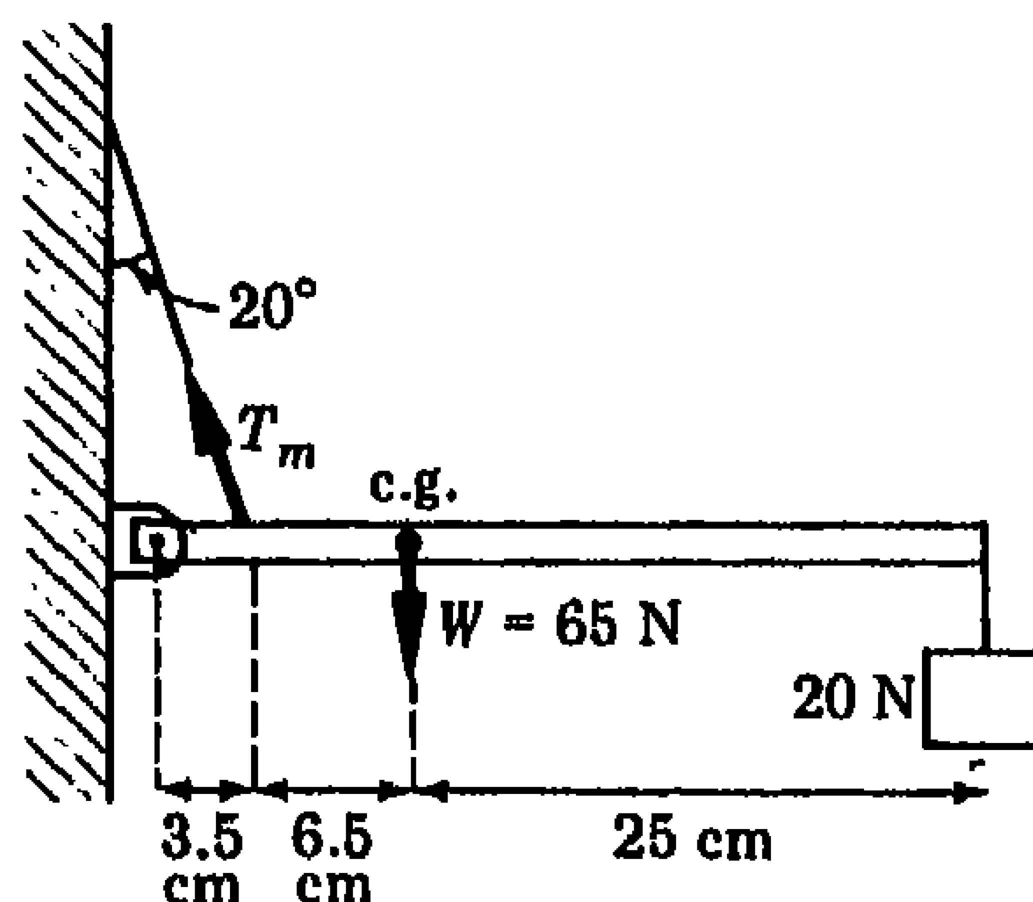
$$T = 292 \text{ lb} \qquad H = 234 \text{ lb} \qquad V = -25 \text{ lb}$$

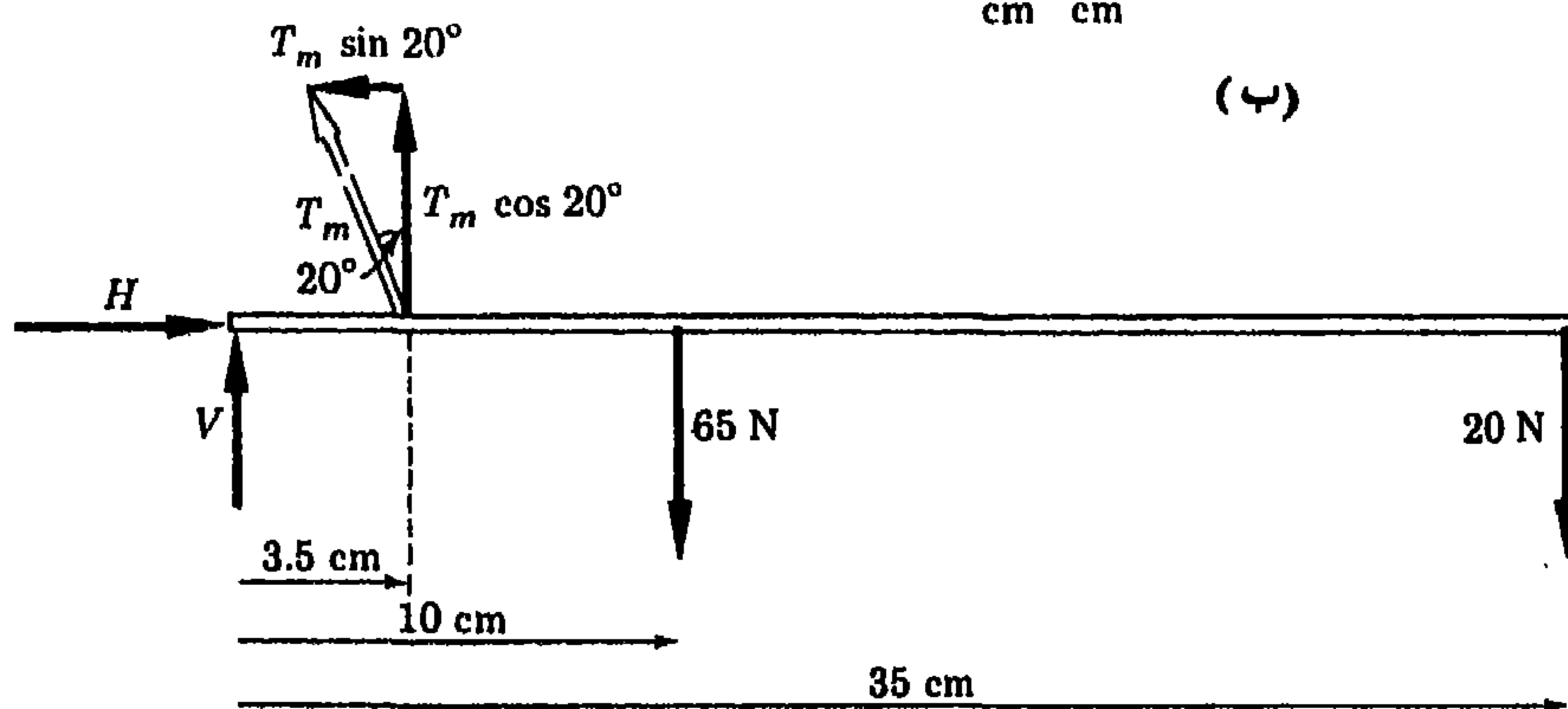
ماذا تعنى اشارة V . السالبة ؟

مثال توضيحى ٨ – ٧ : يحمل شخص ثقلا مقداره 20 N كما هو مبين فى الشكل ٨ – ١٠ أ . اوجد الشد فى العضلة والقوى المركبة عند الكوع .

طريقة الحل : يمكن استبدال النظام بالنموذج المبسط المبين فى الجزء ب . وسنفرض أن وزن الذراع السفلى هو 65 N . يلاحظ أن الأبعاد المبينة هى الأبعاد الحقيقية .







شكل (٨ – ١٠)
يمكننا تحليل القوى فى الذراع الآدمية باستخدام النموذجين المبينين فى (ب) و (جـ) .

لاحظ أن هذا الموقف يشبه كثيرا الموقف المعطى فى المثال التوضيحى السابق الذى يمثل عمودا محمولا بواسطة حبل . يمثل الجزء جـ رسم بيان الجسم الحر فى هذه الحالة . ويمكننا استخدامه لكتابة شروط التوازن :

$$\Sigma F_x = 0: \qquad H - T_m \sin 20^\circ = 0$$
$$\Sigma F_y = 0: \qquad V + T_m \cos 20^\circ - 65 - 20 = 0$$
$$\Sigma \tau = 0: \qquad (T_m \cos 20^\circ)(0.035) - (65)(0.10) - (20)(0.35) = 0$$

حيث أخذ الطرف الأيسر للذراع (الكوع) كمحور . لاحظ أن القوة $T_m \sin 20^\circ$ تؤثر فى الواقع خلال المحور ولذلك فإن عزم دورانها يساوى صفرا .

بحل هذه المعادلات نجد أن :

$$T_m = 410\text{ N} \qquad H = 140\text{ N} \qquad V = -300\text{ N}$$

جميع هذه القوى أكبر كثيرا من وزن الجسم المحمول . هل تستطيع اثبات أن T_m يصبح كبيرا جدا اذا مدت الذراع افقيا ؟ لماذا يكون من المتعب للغاية أن تحمل ثقلا فى يدك الممتدة أفقيا ؟

مثال توضيحى ٨ – ٨ : يستند سلم منتظم وزنه 50 lb على حائط أملس كما فى الشكل ٨ – ١١ . (يعنى المصطلح « **أملس** » أن القوة التى يؤثر بها الحائط على السلم عند نقطة التلامس عمودية على سطحه ، وأن الإحتكاك غير موجود) . فإذا وقف صبى وزنه 100 lb على السلم كما هو مبين ، فما قيمة القوتين المؤثرتين عند الحائط والأرض ؟

طريقة الحل : يعزل السلم وتمثل القوى المؤثرة عليه بيانيا كما فى الجزء ب من الشكل . وبأخذ النقطة A كمحور ، يمكننا كتابة معادلات التوازن كالتالى :

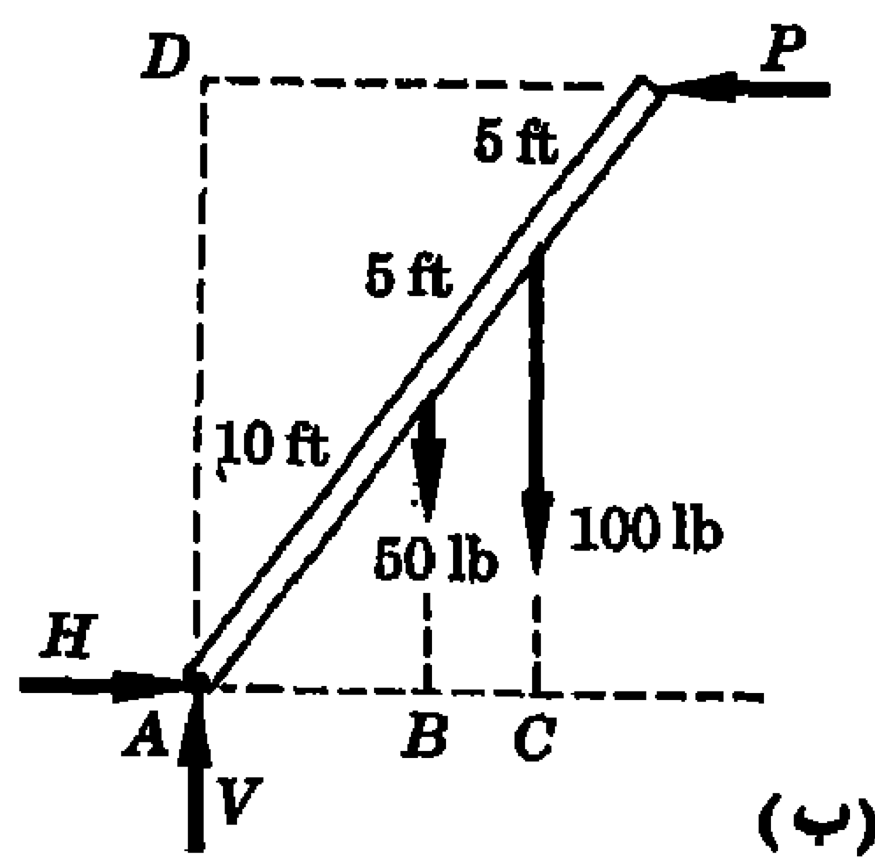
$$\Sigma F_x = 0: H - P = 0$$

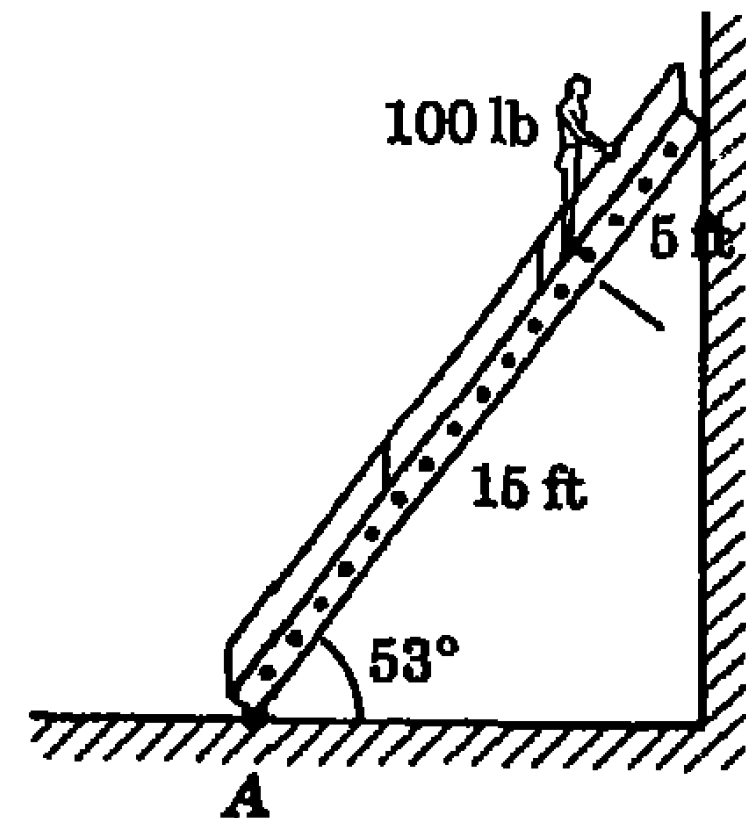
$$\Sigma F_y = 0: V - 50 - 100 = 0 \quad \text{أو} \quad V = 150\text{ lb}$$

$$\Sigma\tau = 0: \ (P)(0.8 \times 20) - (50)(0.6 \times 10) - (100)(0.6 \times 15) = 0$$

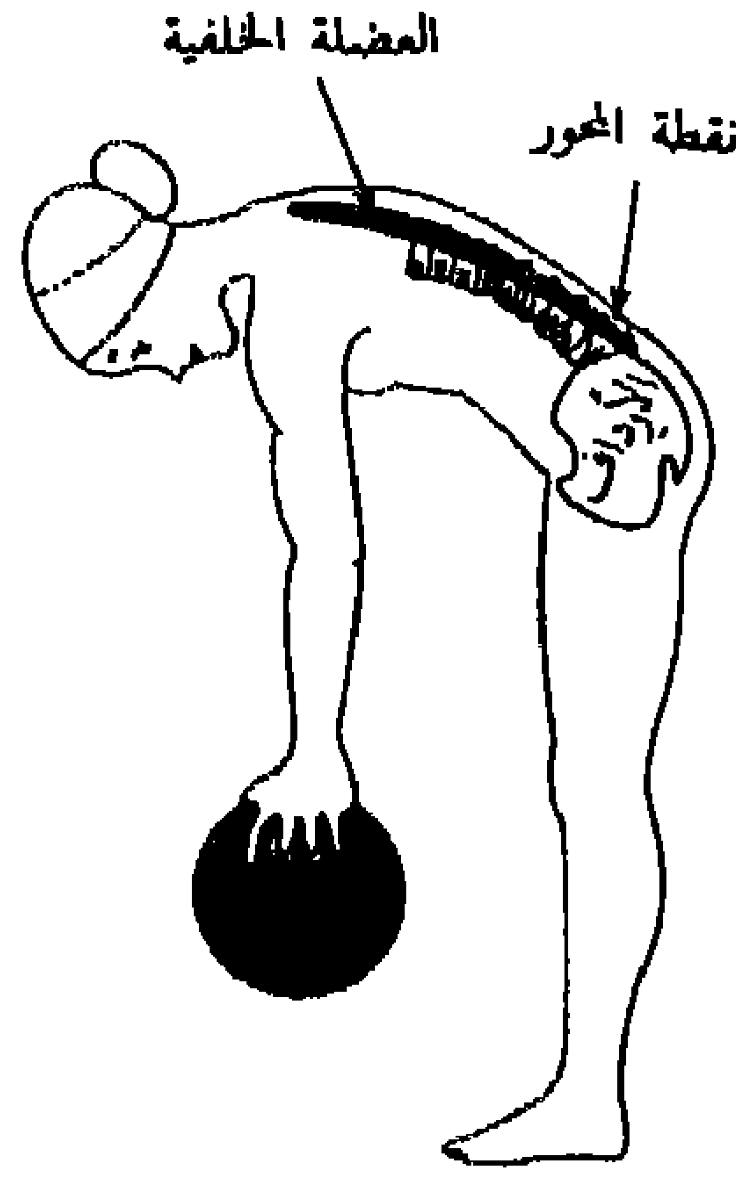
فى هذه المسألة يجب علينا أن نلاحظ أذرع الرافعة على وجه الخصوص . من التعريف ، ذراع الرافعة هو العمود الساقط من المحور A على خط القوة . اذن اذرع الرافعة هى AB ، AC ، AD للقوى 50 ، 100 ، P على الترتيب . وبحل هذه المعادلات آنيا نحصل على :

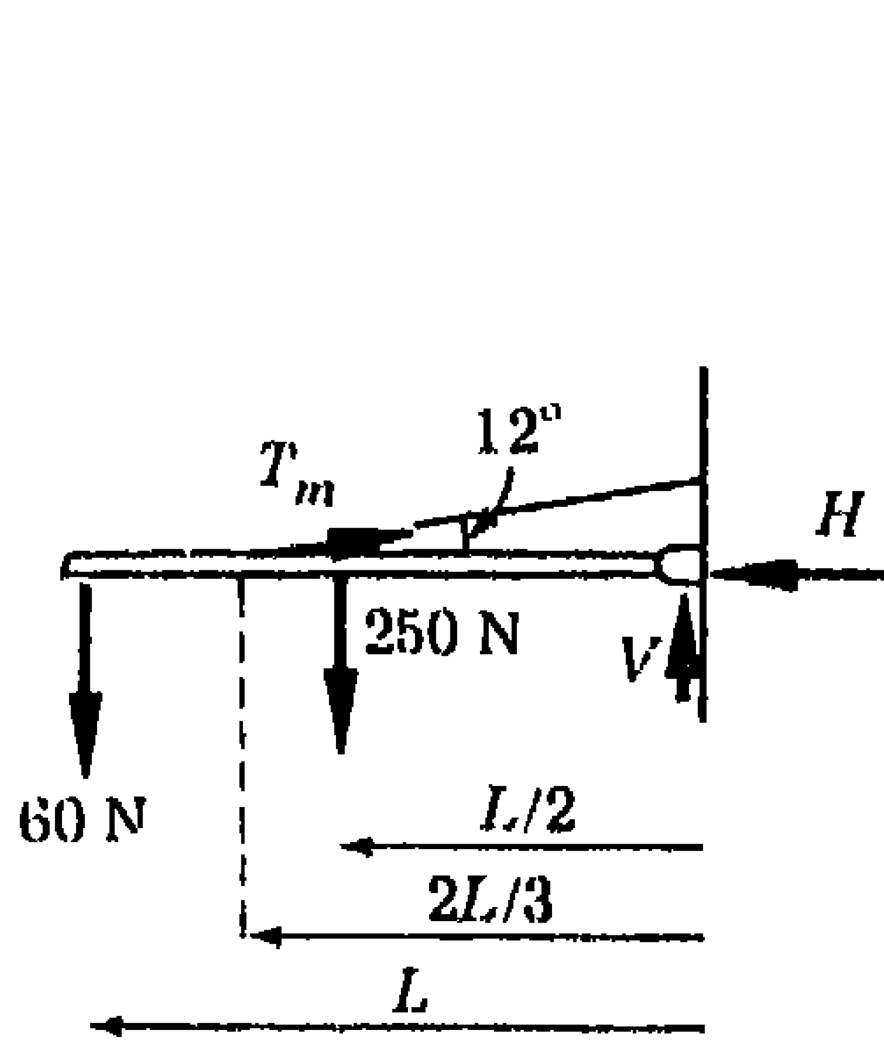
$$V = 150\text{ lb} \qquad P = H = 75\text{ lb}$$





شكل (٨ – ١١)
يقف صبى وزنه 100 lb على سلم وزنه 50 lb كما هو مبين . وبفرض أن الحائط أملس ، تكون القوى المؤثرة على السلم كما هو مبين فى (ب) .





شكل (٨ – ١٢)
يمكن ايجاد القوى الموجودة فى ظهر السيدة باستخدام النموذج المبين فى (ب) .

مثال توضيحى ٨ – ٩ : اعتبر سيدة تحمل كرة بولينج وزنها 60 N كما هو مبين فى الشكل ٨ – ١٢ أ . إوجد الشد فى عضلة ظهرها والقوة التضاغطية فى عمودها الفقرى .

طريقة الحل : يمكننا تمثيل الجزء العلوى الأفقى من جسم السيدة بعمود كما هو مبين فى الشكل ٨ – ١٢ ، والأبعاد مقدرة تقديرا تقريبيا كما هو موضح . بأخذ نقطة الدوران كما هو مبين فى الشكل ، تكتب معادلات التوازن كمايلى :

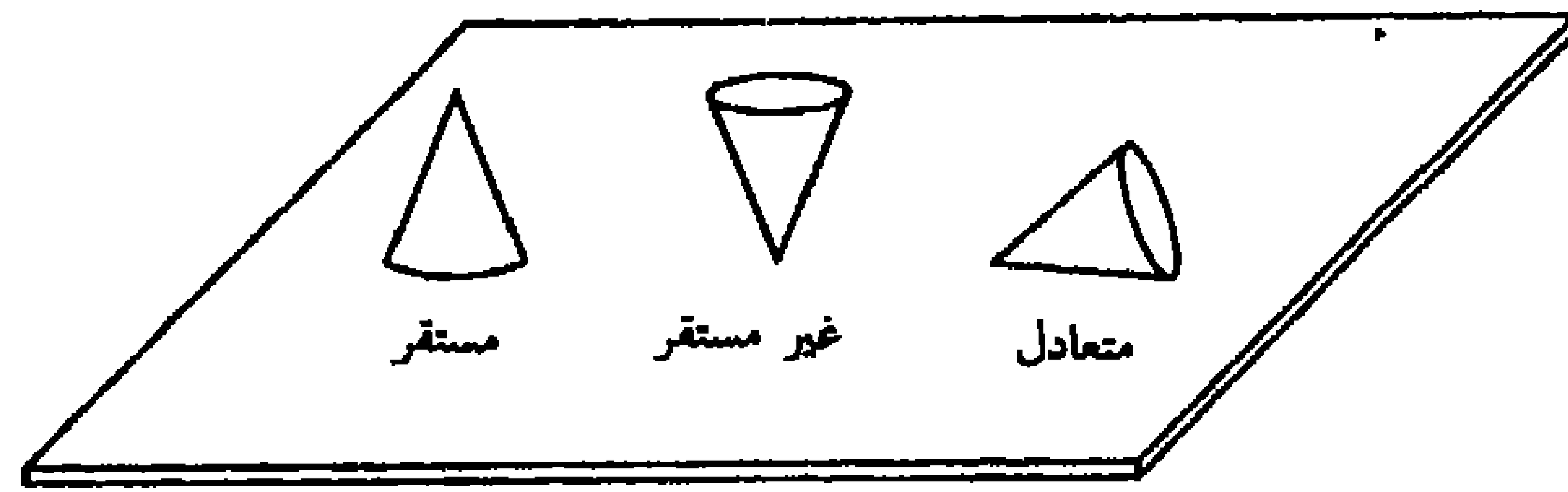
$$\Sigma F_x = 0: \qquad H - T_m \cos 12° = 0$$
$$\Sigma F_y = 0: \qquad T_m \sin 12° + V - 60 - 250 = 0$$
$$\Sigma \tau = 0: \qquad (T_m \sin 12°)\left(\frac{2L}{3}\right) - (250)\left(\frac{L}{2}\right) - (60)(L) = 0$$

والآن كيف تنشأ المعاملات التى تحتوى على T_m ؟ . بحل هذه المعادلات نجد أن :

$$T_m = 1335 \text{ N} \qquad V = 32 \text{ N} \qquad H = 1305 \text{ N}$$

الإنضغاط فى الجزء السفلى من العمود الفقرى هو H . لاحظ أن $H = 1305\text{N} \approx 290$ lb والشد فى عضلة الظهر أكبر من تلك القيمة . وبالرغم من أن السيدة تحمل ثقلا قدره 60 N (حوالى 15 lb) فإن القوتين السابقتين أكبر من ذلك . لماذ لايجب أن نحمل جسما ثقيلا جدا بالطريقة المبينة ؟ كيف يجب أن نحمل جسما ثقيلا ؟

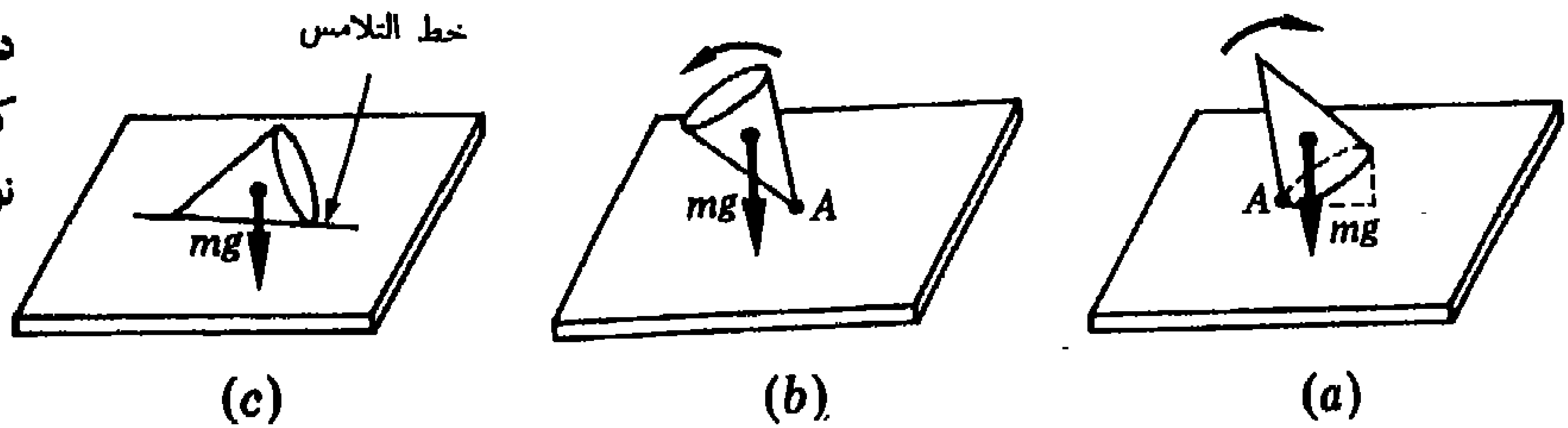
شكل (٨ – ١٣)
أنواع التوازن الاستاتى الثلاثة.



٨ – ٥ التوازن المستقر و المتعادل وغير المستقر

كما رأينا مما سبق يوجد الجسم الجاسىء فى حالة توازن اذا تحقق الشرطان $\Sigma F = 0$ و $\Sigma \tau = 0$. ومع ذلك هناك ثلاثة انواع من التوازن الاستاتى وهى المبينة فى الشكل ٨ – ١٣ . ومن الواضح كيف سمى الإتزان المستقر وغير المستقر بهذين الاسمين . فإذا أملنا المخروط المستقر قليلا عن الوضع المبين ثم تركناه فإنه سوف يعود الى هذا الوضع . ولكن اذا أملنا المخروط غير المستقر قليلا فإنه سوف يقع . أما الحالة الثالثة ، حالة الاتزان المتعادل ، فإنها تتميز بأن الجسم لايفضل وضعا معينا على الأوضاع الأخرى .

شكل (٨ – ١٤)
يسبب وزن الجسم عزم دوران حول نقطة التلامس كمحور . ويحدد هذا العزم نوع التوازن الموجود.



تعريف يقال أن الجسم فى حالة **توازن مستقر** بالنسبة الى اضطراب صغير اذا عاد الجسم الى حالته غير المضطربة بعد زوال سبب الاضطراب . فمثلا ، لنفرض أن المخروط المبين فى الشكل ٨ – ١٤ أ قد تعرض لاضطراب طفيف . وإذا حرر الجسم فإنه سوف يعود الى وضعه الأصلى . وتنشأ هذه العودة نتيجة لعزم الدوران الناتج من الوزن mg حول نقطة التلامس A . ويجب أن نلاحظ هنا أن مركز ثقل الجسم قد ارتفع أثناء الاضطراب نتيجة لذلك تكون طاقة وضع الجسم فى الوضع المستقر أقل منها فى الوضع المضطرب .

تعريف يقال أن الجسم فى حالة **توازن غير مستقر** بالنسبة الى اضطراب صغير اذا سبب الجسم نفسه زيادة الإضطراب بعد زاول سبب الاضطراب . فمثلا ، يستمر المخروط المبين فى الشكل ٨ – ١٤ ب فى الوقوع اذا حرر ويجذب

الجسم نتيجة لعزم الدوران الذى يسببه الوزن mg حول نقطة التلامس A . علاوة على ذلك يجب أن نلاحظ أن الاضطراب يخفض مركز الثقل ويسبب نقص طاقة وضع الجسم فى الجزء ب .

تعريف يقال أن الجسم فى حالة **توازن متعادل** اذا كان الجسم محايدا بالنسبة للإضطراب . فمثلا ، يستمر الجسم المبين فى جـ فى أى وضع يدحرج إليه . وفى هذه الحالة يكون عزم الدوران الناتج من القوة mg حول نقطة التلامس كمحور صفرا ، لأن خط القوة يمر بخط التلامس . بالإضافة الى ذلك فإن هذا النوع من الإضطراب لايسبب أى رفع أو خفض لمركز ثقل الجسم ، وبناء على ذلك فإن الإضطراب لايسبب أى تغير فى طاقة وضع الجسم .

وهذا المثال الفيزيائى المحدد ليس المثال الوحيد . فجميع الاجسام الجاسئة تتصرف بطريقة مشابهة . يمكننا اذن أن نضع الصيغة التالية فيما يتعلق بالتوازن الاستاتى،

التوازن الاستاتى توازن الجسم قد يكون (١) مستقرا ، أو (٢) غير مستقر ، أو (٣) متعادلا اذا كان الإضطراب الصغير يسبب (١) زيادة ، أو (٢) نقص ، أو (٣) لايسبب تغير طاقة وضع الجسم .

وفى الحقيقة فإننا سوف نرى أن هذه العبارة تنطبق على الأنواع الأخرى لطاقة الوضع بالاضافة الى طاقة الوضع التثاقلية .

٨ – ٦ تشابهات أخرى بين الحركة الخطية والحركة الدورانية

يعلم أى شخص ادار فى وقت ما عجلة حول محورها أن للعجلة خاصية ترتبط ارتباطا وثيقا بالقصور الذاتى . وحقيقة أن للجسم قصورا ذاتيا يجعل من الضرورى علينا أن نسلط على الجسم قوة معينة إذا أريد وضعه فى حالة الحركة . بالمثل ، إذا أريد إيقاف جسم متحرك يلزم أن نؤثر عليه بقوة معينة لكى يصل الى حالة السكون . وهذه الأدلة على وجود القصور الذاتى فى الحركة الخطية يمكن أن نجدها بسهولة فى حالة دوران جسم حول محور .

فمثلا ، تستمر ريشة المروحة الدائرة فى الدوران لفترة معينة بعد إيقاف موتور المروحة . وإذا حاول شخص ايقاف الريشة بإصبعه فإنه قد يجد أن القصور الذاتى الدورانى للريشة كافيا لأن يؤذى اصبعه . من الواضح ايضا أن ريشة المروحة تقاوم بدء دورانها لأن الموتور يحتاج بضع ثوان لكى يسبب تسارع المروحة . وتوجد هذه الأدلة على القصور الذاتى بدرجة أقل أو أكبر فى جميع الأجسام الدوارة .

وجدنا فى الفصول السابقة أن القوة اللازمة للتغلب على تأثيرات القصور الذاتى ولتحريك الجسم حركة خطية تعطى بقانون نيوتن الثانى :

$$F = ma$$

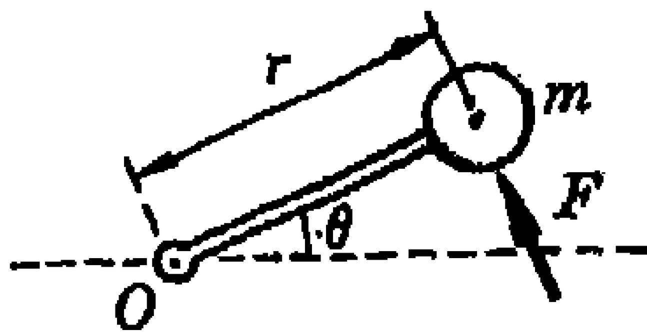
رأينا كذلك فى الفصل الأخير أن هناك نظيرا دورانيا منطقيا لكل من معادلات الحركة الخطية . ومن الواضح أن التسارع الخطى a فى قانون نيوتن يجب أن يبدل بالتسارع الزاوى α فى الحركة الدورانية . وحيث أن عزم الدوران هو الذى يسبب دوران الجسم ، يمكننا أن نخمن أن القوة غير المتزنة F يجب أن تستبدل بعزم الدوران غير المتزن τ . وسوف نرى فى جزء لاحق أن هذا صحيح .

وبالرغم من ذلك فإن من غير الواضح تماما بماذا يجب أن تستبدل الكتلة m لكى نحصل على الصورة الدورانية لقانون نيوتن . وسوف نرى حالا أنها يجب أن تستبدل بكمية تسمى **عزم القصور الذاتى** . ويجب أن تعتمد هذه الكمية على الكتلة لأننا نعلم جميعا أنه من الصعب أن نسبب دوران الكتل الكبيرة عن الكتل الصغيرة . ومع ذلك فإننا سوف نرى أن الشكل الهندسى للجسم ذو أهمية كبيرة ايضا .

وفى النهاية يجب أن نشير الى أن سرعة مركز كتلة عجلة تدور حول محور ساكن تساوى صفرا ، ولهذا فإن العجلة لاتملك أى طاقة حركة انتقالية . كذلك فإنها لاتملك أى كمية تحرك انتقالية . علاوة على ذلك فإننا نعلم أن الحدافة يمكنها أن تبذل شغلا بسبب دورانها . فمثلا يمكنها أن تلف حبلا يحمل ثقلا معلقا فيه . أى أن للحدافة طاقة حركة . وفى الاجزاء التالية من هذا الفصل سنوجد تعبيرا لطاقة الحركة الدورانية وتعبيرا لكمية التحرك الدورانى لجسم دوار .

٨ – ٧ العلاقة بين عزم الدوران والتسارع الزاوى :

يمثل الشكل ٨ – ١٥ كتلة كبيرة نسبيا m مثبتة فى محور عند O بواسطة قضيب خفيف جدا . لنفرض أن كرسى التحميل عند نقطة الدوران O لااحتكاكى ، ولنفرض ايضا أن كتلة القضيب مهملة . لنعتبر أن النظام موجود فى مستوى افقى بحيث لاتسبب الجاذبية أى عزم دوران حول نقطة الدوران .



شكل (٨ – ١٥)
تسبب القوة F عزم دوران حول المحور O وتعطى الكتلة m تسارعا زاويا حول نقطة الدوران .

واضح من الرسم أن القوة F المؤثرة على الكتلة m لاتضادها أية قوة أخرى نظرا لعدم وجود احتكاك فى محور الارتكاز . أى أنها قوة غير متزنة مؤثرة على m ، لذلك فإنها تسبب تسارع الكتلة حسب العلاقة

$$F = ma$$

ومع ذلك فإن هذه القوة تسبب دوران الكتلة حول نقطة الدوران أثناء ذلك

وحيث أننا قد رأينا فى الفصل السابق التسارع الخطى a يرتبط بالتسارع الزاوى α بالعلاقة :

$$\alpha r = a$$

فإن

$$F = mr\alpha$$

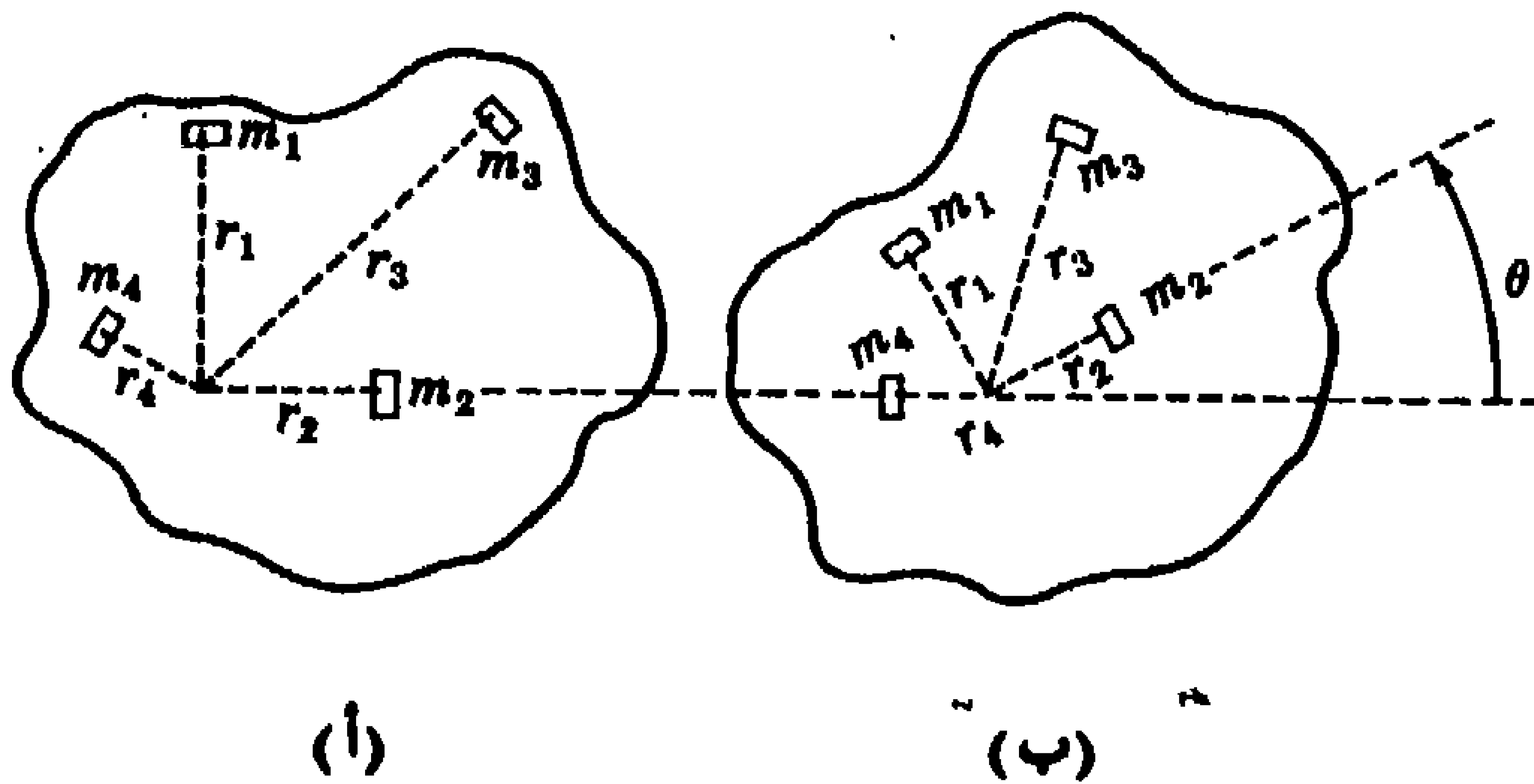
لاحظ أن العلاقة بين α و a صحيحة فى المقياس النصف قطرى فقط ، ولذلك فإن الزوايا يجب أن تكون مقاسة بالزاوية النصف قطرية عند استخدام المعادلة .

وإذا لم تكون القوة F فى الشكل ٨ — ١٥ عمودية على القضيب فإن مركبة F المؤثرة على الكتلة فى الإتجاه العمودى على القضيب هى فقط التى ستسبب دوران الجسم . وماهذه إلا طريقة اخرى للقول بأن الدوران ينشأ نتيجة لعزم الدوران ، لأن عزم الدوران هو حاصل ضرب القوة فى ذراع رافعتها . إذن من المستحسن أن نكتب معادلات الدوران بدلالة عزم الدوران . ويمكننا عمل ذلك بضرب طرفى المعادلة الأخيرة فى r لأن عزم الدوران هو Fr . اذن :

حيث α مقاسة بالوحدات $mr^2\alpha =$ عزم الدوران $= \tau = Fr$ (٨ — ٥)

المعادلة (٨ — ٥) هى صورة لنظير معادلة نيوتن $F = ma$ وكما توقعنا : استبدلت F بعزم الدوران المؤثر على النظام τ ، واستبدال التسارع الخطى a بالتسارع الزاوى α . وبدلا من m ظهرت لدينا مايسمى عزم القصور الذاتى للنظام ، mr^2 . لاحظ أن القصور الذاتى الدورانى للنظام لايعتمد على m فقط ولكن على r كذلك . وسوف نتكلم عن ذلك بتفصيل أكبر فيما بعد .

وعمليا تكون كتلة معظم الأجسام الجاسئة موزعة على قيم مختلفة كثيرة للبعد r عن نقطة الإرتكاز ، وهذا مبين فى الشكل ٨ — ١٦أ . ويمكننا تحوير المعادلة (٨ — ٥) بسهولة لتنطبق على هذه الحالة أيضا . وينحصر التغير الوحيد فى تقسيم الجسم الجاسىء الى أجزاء صغيرة على أنصاف أقطار مختلفة وكتابة المعادلة (٨ — ٥) لكل كتلة على حدة .



شكل (٨ — ١٦) تقع جميع الكتل الصغيرة التى تتكون منها كتلة الجسم الجاسىء الكبير تحت تأثير نفس التسارع الزاوى حول نقطة الدوران .

يوضح الشكل ٨ – ١٦أ عددا من القطع الصغيرة التى تتكون منها كتلة الجسم وينشأ عزم الدوران حول محور الارتكاز ، والذى يؤثر على الكتلة الأولى ، نتيجة لجميع القوى المؤثرة عى تلك الكتلة ، سواء كانت قوى خارجية بالنسبة للجسم أو ناتجة من الكتل القريبة من الكتلة الأولى . لنسمى عزم الدوران هذا τ_1 . بتطبيق المعادلة (٨ – ٥) على هذه الكتلة نجد أن :

$$\tau_1 = m_1 r_1^2 \alpha_1$$

حيث r_1 مبينة فى الشكل . ويمكن كتابة معادلة مماثلة لأى كتلة فى الجسم . لنكتب مجموع هذه المعادلات :

$$\tau_1 + \tau_2 + \cdots + \tau_N = m_1 r_1^2 \alpha_1 + m_2 r_2^2 \alpha_2 + \cdots + m_N r_N^2 \alpha_N \qquad (٨ - ٦أ)$$

حيث افترضنا أن عدد الكتل التى تكون الجسم هو N . ويمكن كتابة هذه المعادلة بصور مختصرة بتحوير المعادلة (٨ – ٦أ) كمايلى :

$$\sum_{i=1}^{N} \tau_i = \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2 \alpha_i \qquad (٨ - ٦ب)$$

حيث يعنى الرمز $\sum_{i=1}^{N}$ أن نأخذ مجموع الحدود . وللحصول على الحد الأول تستبدل i بالرقم 1 . وفى الحد الثانى تستبدل i بالرقم 2 ... الخ . وفى النهاية يستنتج الحد الأخير باستبدال i بالرقم N . وحيث أن الجسم الذى ندرسه جسم جاسىء ، فإن كل كتلة فيه تدور حول المحور فى نفس الوقت . وكما هو موضح فى الشكل ٨ – ١٦ ب ، تدور كل كتلة بنفس الزاوية عندما يدور الجسم . وهكذا فإن السرعة الزاوية والتسارع الزاوى لابد أن يكونا ثابتين لجميع الكتل . بناء على ذلك تكون كل من قيم α_i فى المعادلة (٨ – ٦ب) مساوية للقيم الأخرى وبالتالى يمكن أخذها كعامل مشترك لنحصل على :

$$\sum_{i=1}^{N} \tau_i = \alpha \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2 \qquad (٨ - ٦جـ)$$

لندرس الآن معنى الطرف الأيسر للمعادلة (٨ – ٦جـ) . يمثل هذا الطرف فى الواقع مجموع جميع عزوم الدوران المؤثرة على الكتل المنفصلة . ولكى نعبر عنه بدلالة عزم الدوران الذى تؤثر به القوى الخارجية على الجسم ككل ، اعتبر الحقيقة التالية : إذا أردنا ألا يدور الجسم على الإطلاق تحت تأثير عزوم الدوران الخارجية يمكننا أن نمنع الجسم من الدوران باحدى طريقتين . يمكننا أن نؤثر على الجسم بعزم دوران

مساو فى المقدار ومضاد فى الإتجاه لكى نلاشى عزم الدوران الخارجى الأصلى . ويمكننا أن نؤثر على كل من الكتل بعزوم دوران صغيرة بحيث تلاشى تماما عزوم الدوران المنفصلة المؤثرة عليها . نرى اذن أن عزم الدوران الخارجى المؤثر على الجسم ككل يكافىء عددا من عزوم الدوران الصغيرة مقداره N تؤثر على الكتل المنفصلة التى يتكون منها الجسم . من هذا ينتج أن الطرف الايسر للمعادلة (٨ - ٦جـ) يكافىء عزم الدوران الخارجى τ المؤثر على الجسم . يمكننا اذن أن نكتب المعادلة (٨ - ٦جـ) فى الصورة :

$$\tau = \alpha \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2 \qquad (٨ - ٦د)$$

تعريف

من المعتاد تعريف الكمية I ، **عزم القصور الذاتى** للجسم ، كمايلى

عزم القصور الذاتـى

$$I \equiv \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2 \qquad (٨ - ٧)$$

وبالتعويض من المعادلة السابقة فى المعادلة (٨ - ٦د) نجد أن :

$$\tau = I\alpha \qquad (٨ - ٨)$$

هذه المعادلة هى النظير الدورانى للعلاقة $F = ma$. فى حالة الأجسام الجاسئة الممتدة . ونحن نرى أن عزم الدوران يحل محل القوة وأن التسارع الزاوى يحل محل التسارع الخطى . أما تأثير القصور الذاتى الذى يقابل الكتلة فهو موجود فى عزم القصور الذاتى I . ولكى نرى معنى عزم القصور الذاتى بطريقة أوضح ، لنكتب المعادلة (٨ - ٧) مرة أخرى فى حالة خاصة . لنفرض أن الجسم قد قسم الى أجزاء متساوية الكتلة بحيث كانت كل كتة منها m_i . اذن تتحول المعادلة (٨ - ٧) الى الصورة :

$$I = mr_1^2 + mr_2^2 + mr_3^2 + \cdots + mr_N^2$$

أو ؛

$$I = m(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \cdots + r_N^2)$$

ويمكن كتابة المعادلة الأخيرة على الصورة :

$$I = Nm\frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \cdots + r_N^2}{N}$$

نصف قطر الحركـة التدويمية

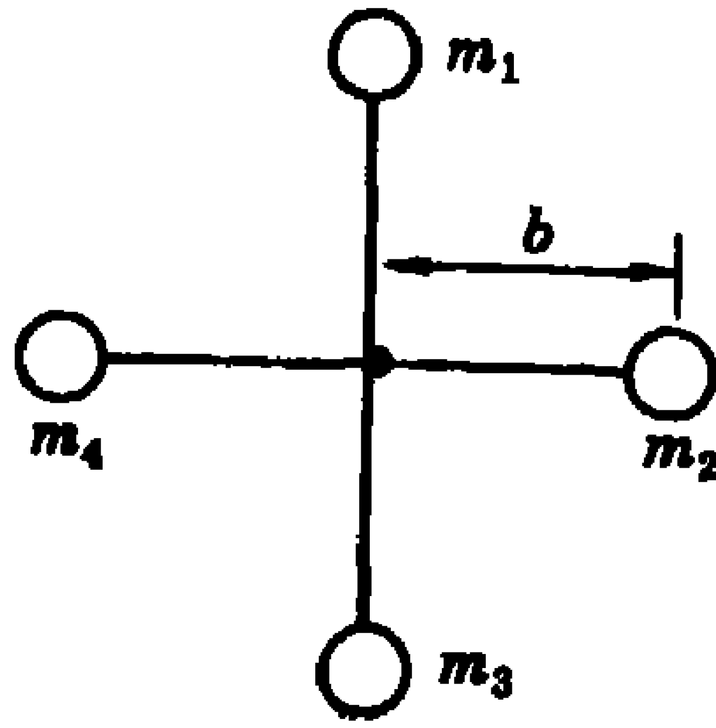
ولكن حيث أن Nm هى الكتلة الكلية للجسم M ، فإن الحد الثانى هو القيمة المتوسطة لقيم r^2 المختلفة للكتل التى تكون الجسم . ويرمز لمتوسط مربع نصف القطر هذا بالرمز K^2 ، وسنسمى K **نصف قطر الحركة التدويمية** للجسم . والمقدار K^2 هو

المقياس المتوسط لمربع المسافة من نقطة الدوران الى الأجزاء المختلفة من المادة التى تكون الجسم . وبالرموز :

$$I = MK^2$$

ونحن نرى من تعريف I أنه مقياس للقصور الذاتى الدورانى للجسم . كذلك فإن القصور الذاتى الدورانى للجسم يتناسب مع كتلته ويتناسب أيضا مع متوسط مربع المسافة من محور الارتكاز الى أجزاء الكتلة التى تكون الجسم .

٨ - ٨ عزم القصور الذاتى لبعض الأجسام



شكل (٨ - ١٧)
نصف قطر الحركة التدويمية لهذا الجسم بالنسبة لمحور يقع فى المركز هو b مباشرة . حجم الكرات مبالغ فيه .

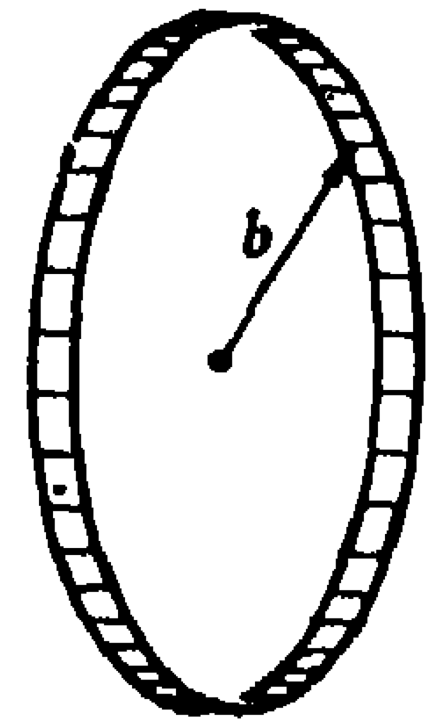
علمنا من الجزء السابق أن عزم القصور الذاتى لجسم هو حاصل ضرب كتلة الجسم فى مربع بعد معين لهذه الكتلة عن نقطة الدوران أو المحور .

ويمكن ايجاد هذه المسافة ، أى نصف قطر الحركة التدويمية ، بسهولة فى حالات معينة . فمثلا ، تمثل الكتل الأربع المركبة على إطار جاسىء عديم الوزن ، والمبينة فى الشكل ٨ - ١٧ ، موقفا بسيطا للغاية . وحيث أن $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = b$ فإن متوسط المسافة بين نقطة الدوران الموجودة فى المركز وأجزاء الكتلة المختلفة هو b مباشرة . وعليه فإن I لهذا الجهاز يساوى Mb^2 ، حيث M هى مجموع الكتل m_1 ، m_2 ، m_3 ، m_4 .

جدول ٨ - ١
عزم القصور الذاتى لبعض الأجسام

الجسم (المحور كما هو موضح)		I	K نصف قطر الحركة التدويمية
طوق		mb^2	b
قرص مصمت		$\frac{1}{2}mb^2$	$b/\sqrt{2}$
كرة مصمتة		$\frac{2}{5}mb^2$	$b\sqrt{\frac{2}{5}}$
اسطوانة مصمتة (b ، نصف قطرها)		$\frac{1}{2}mb^2$	$b/\sqrt{2}$
اسطوانة مصمتة (رقيقة) (L طولها)		$\frac{1}{12}mL^2$	$L/\sqrt{12}$

ويمثل الطوق أو الطارة حالة هامة أخرى ، وهى مبينة فى الشكل ٨ – ١٨ . لاحظ مرة أخرى أن الكتلة كلها تقع على مسافة قدرها b من نقطة الدوران . وإذا كانت m هى كتلة الطوق فإن I ستكون mb^2 .

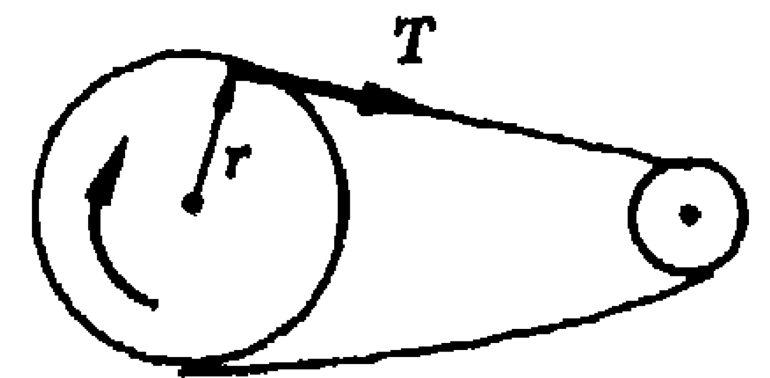


شكل (٨ – ١٨)
نصف قطر الحركة التدويمية للطوق حول محورها يساوى نصف قطر الطوق .

هناك حالات أخرى بسيطة للغاية يمكن فيها ايجاد I بدون صعوبة كبيرة ، ويوضح الجدول ٨ – ١ بعضا من هذه الحالات . لاحظ فى هذا الشأن أن نصف قطر الحركة التدويمية K هو بالفعل مقياس لمتوسط بعد الكتلة عن المحور ، أو نقطة الدوران . فى حالة الطوق الرقيق يكون $K \doteq b$ لأن الكتلة كلها تقع على بعد b من المحور . ومع ذلك فإن K أقل من b فى حالة القرص ، لأن الكتلة الخارجية فقط هى التى تبعد عن المحور مسافة قدرها b . وفى هذه الحالة يكون $K = b/\sqrt{2}$.

وحدات I هى وحدات الكتلة مضروبة فى مربع وحدات المسافة . لهذا فإنها ستكون سلج – قدم مربع أو كيلوجرام – متر مربع .. الخ . وأيضا يجب أن نوضح مرة أخرى أن استخدام العلاقة $a = r\alpha$ فى اشتقاق المعادلة (٨ – ٨) يحدد الوحدات المستخدمة فى هذه المعادلة.لذلك فإن التسارع الزاوى α يجب أن يكون مقاسا بالزاوية النصف قطرية فى الثانية فى الثانية .

مثال توضيحى ٨ – ١٠ : يمثل الشكل ٨ – ١٩ عجلة كبيرة كتلتها 80 kg ونصف قطرها 25 cm ونصف قطر الحركة التدويمية لها 20 cm . وتدار هذه العجلة بواسطة السير المبين بالشكل تحركه بكرة صغيرة على موتور . أوجد الشد فى السير ، اللازم لكى يسبب تسارع العجلة بانتظام الى سرعة قدرها 2.0 rev/s فى زمن قدره 20 s .



شكل (٨ – ١٩)
ينقل التسارع الزاوى للعجلة الكبيرة بواسطة عزم الدوران الناتج من الشد T فى السير العلوى .

طريقة الحل : قبل أن نستطيع تطبيق العلاقة $\tau = I\alpha$. يجب علينا أن نوجد α من مسألة الحركة . المعطيات :

$$\omega_0 = 0 \qquad t = 20\,\text{s}$$
$$\omega_f = 2.0\,\text{rev/s} = 4\pi\,\text{rad/s}$$

نستخدم العلاقة :

$$\omega_f = \omega_0 + \alpha t$$
$$4\pi\,\text{rad/s} = (20\,\text{s})(\alpha) \qquad \alpha = \frac{\pi}{5}\,\text{rad/s}^2$$

(لاحظ أننا قد حولنا الكميات الى المقياس النصف قطرى بحيث يكون α مقاسا بالوحدات المناسبة لمعادلة عزم الدوران) .

والآن نحن فى حاجة الى معرفة I ، وهو ببساطة mK^2، حيث K نصف قطر الحركة التدويمية . إذن تتحول العلاقة $\tau = I\alpha$ الى :

$$\tau = (80 \text{ kg})(0.20 \text{ m})^2(0.20\pi \text{ rad/s}^2) = 0.64\pi \text{ N} \cdot \text{m}$$

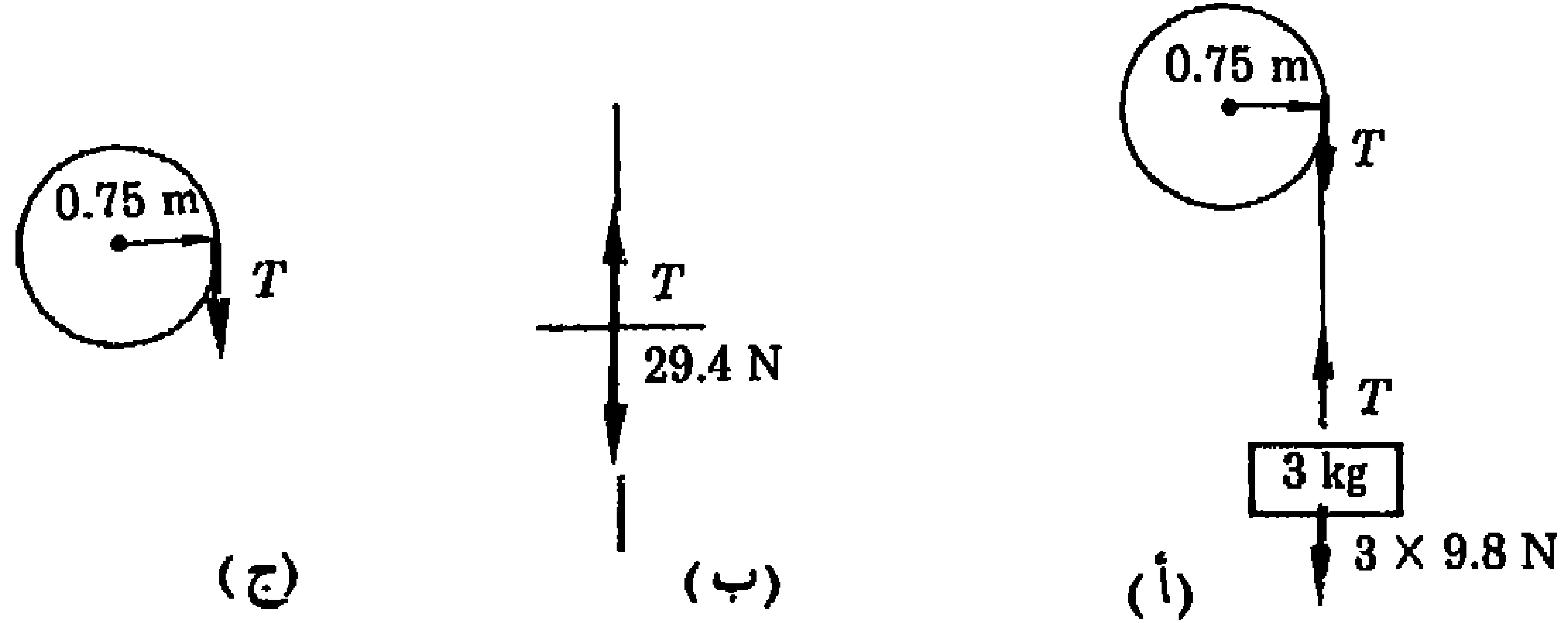
ولكن عزم الدوران هو القوة مضروبة فى ذراع الرافعة . وواضح من الرسم أن القوة هى الشد T فى السير ، وذراع الرافعة هو نصف قطر العجلة . اذن :

$$\tau = (T)(0.25 \text{ m})$$

ومنه :

$$T = 2.56\pi \text{ N} \approx 8.0 \text{ N}$$

مثال توضيحى ٨ — ١٩ : علق جسم كتلته 3 kg فى حبل ملفوف على عجلة كتلتها 40 kg كما هو موضح فى الشكل ٨ — ٢٠ . وكان نصف القطر الفعلى للعجلة هو 0.75 ونصف قطر الحركة التدويمية لها 0.60 m . اوجد (أ) التسارع الزاوى للعجلة ، (ب) المسافة التى يسقطها الثقل فى أول 10 s بعد تحريره . لاحظ أن وزن جسم كتلته 3 kg هو 3 × 9.8 N .



شكل (٨ — ٢٠)
يتسارع الجسم الذى كتلته 3 kg تحت تأثير جذب الجاذبية وينقل الشد فى الحبل التسارع الزاوى الى العجلة .

طريقة الحل : نحل المسائل التى تتضمن جسمين بعزل كل منها تباعا . (أ) القوة غير المتزنة المؤثرة على الجسم المعلق فى الحبل هى 29.4 −T كما هو واضح من الشكل ٨ — ٢٠ ب . باستخدام قانون نيوتن $F = ma$ نجد أن :

$$29.4 - T = 3a \qquad (٨ - ٩)$$

وبعزل العجلة كما فى الجزء جـ من الشكل نجد أن :

$$\tau = I\alpha$$
$$T(0.75) = (40)(0.60)^2\alpha$$

أو :

$$T = 19.2\alpha \qquad (٨ - ١٠)$$

الفكرة العامة هى أن نحل هاتين المعادلتين ، (٨ — ١٠) و (٨ — ٩) آنيا . ولتحقيق ذلك تستخدم حقيقة أن $a = r\alpha$ ، التى تعطى فى هذه الحالة $a = 0.75\alpha$. عندئذ تتحول المعادلة (٨ — ٩) الى :

$$29.4 - T = 2.25\alpha$$

وبالتعويض من المعادلة (٨ – ١٠) نحصل على

$$29.4 = 21.45\alpha$$

ومنه

$$\alpha = 1.37 \text{ rad/s}^2$$

ويجب على الطالب أن يستخدم الوحدات فى الحل ليتأكد من صحة وحدات الإجابة .

(ب) تستخدم معادلات الحركة الخطية المعروفة مع حقيقة أن :

$$a = r\alpha \approx 1.03 \text{ m/s}^2$$

المعطيات:

$$a = 1.03 \text{ m/s}^2 \qquad v_0 = 0 \qquad t = 10 \text{ s}$$

وباستخدام العلاقة :

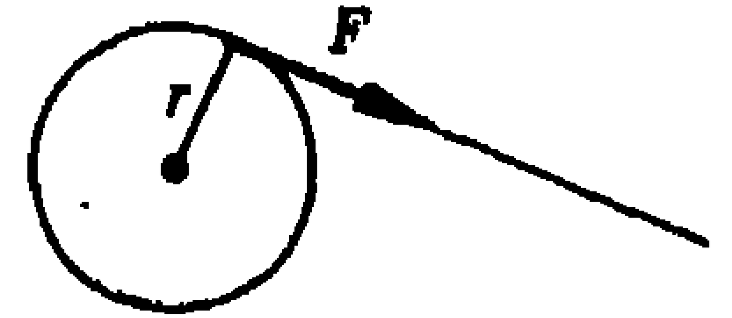
$$s = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

نحصل على :

$$s \approx 51.5 \text{ m}$$

وإذا كانت المسافة مقاسة سابقا ومعروفة يمكننا أن نعكس الطريقة ونحسب عزم القصور الذاتى للعجلة . ويستخدم هذه النوع من التجارب أحيانا لتعيين عزوم القصور الذاتى وأنصاف أقطار الحركة التدويمية .

٨ – ٩ طاقة الحركة الدورانية



شكل (٨ – ٢١)
عندما يجذب الشخص الحبل بقوة قدرها F فانه يبذل شغلا أثناء فك الحبل . وهذا الشغل يؤدى الى زيادة طاقة الحركة الدورانية للعجلة .

اعتبر تجربة يستخدم فيها حبل ملفوف حول عجلة لتعجيل عجلة من السكون ، وهذا الموقف مبين فى الشكل ٨ – ٢١ ، حيث رمزنا للشد فى الحبل بالرمز F . السؤال الآن هو : ماهو الشغل الذى يبذله شخص يجذب الحبل الى أسفل على العجلة عندما تدار العجلة .

اذا جذب الحبل الى الخارج مسافة قدرها s ، من الواضح أن الشغل المبذول على العجلة سيكون :

الشغل المبذول $= Fs$ (٨ – ١١)

لايجاد s يجب علينا أن نعي أولا زاوية دوران العجلة خلال زمن تسليط القوة F . من الضرورى إذن حساب التسارع الزاوى α من العلاقة :

$$\tau = I\alpha$$

وبالتعويض عن عزم الدوران بالمقدار Fr نحصل على :

$$\alpha = \frac{Fr}{I} \qquad \text{أو} \qquad Fr = I\alpha$$

والآن ، بحل مسألة الحركة الدورانية لإيجاد الزاوية التى دارتها العجلة θ ، نجد أن :

$$2\alpha\theta = \omega_f^2 - \omega_0^2$$

وبعد التعويض عن α نحصل على :

$$2\frac{Fr}{I}\theta = \omega_f^2 - 0$$

أو :

$$\theta = \frac{\omega_f^2 I}{2Fr}$$

وحيث أن $s = r\theta$ ، يمكننا أن نستبدل المعادلة (٨ – ١١) بالمعادلة :

$$\tfrac{1}{2}I\omega_f^2 = \text{الشغل المبذول}$$

وهذه علاقة غاية فى الأهمية . وهى تنص على أن كمية الشغل التى بذلت على العجلة قد تحولت الى طاقة دورانية للعجلة مقدارها $\frac{1}{2}I\omega^2$. **تعرف طاقة الحركة الدورانية للعجلة بأنها** $\frac{1}{2}I\omega^2$ **تعريف**

طاقة الحركة الكلية

طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك حركة انتقالية وحركة دورانية فى نفس الوقت هى $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$. ويجب أن يكون عزم القصور الذاتى حول مركز الكتلة وأن تكون v هى سرعة مركز الكتلة .

لدينا إذن العلاقتان التاليتان لطاقة الحركة ، واحدة لطاقة الحركة الإنتقالية والأخرى لطاقة الحركة الدورانية .

$$\text{طاقة الحركة الانتقالية} = \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad (\text{٨ – ١٢})$$
$$\text{طاقة الحركة الدورانية} = \tfrac{1}{2}I\omega^2$$

ونحن نرى مرة أخرى أن السرعة الخطية v قد حلت محلها السرعة الزاوية ω . بالإضافة الى ذلك ، استنتجت معادلة طاقة الحركة الدورانية باستبدال الكتلة m بعزم القصور الذاتى I .

من هذا نرى أن طاقة الحركة الدورانية وتساوى $\frac{1}{2}I\omega^2$ لجميع الأجسام التى يمكن أن تدور تنشأ نتيجة للحركة الدورانية للجسم . وكما هو صحيح فى حالة طاقة الحركة الانتقالية ، من الممكن أن تتحول طاقة الحركة الدورانية أيضا الى شغل وطاقة وضع . وسوف نستخدم هذه الحقيقة فى المثال التوضيحى التالى .

مثال توضيحى ٨ – ١٢ : تبدأ الكرة المبينة فى الشكل ٨ – ٢٢ فى التدحرج إلى أسفل من السكون من قمة مستوى مائل ارتفاعه h . فإذا كان نصف قطر الكرة r وكتلتها m ، فبأى سرعة تتحرك هذه الكرة عندما تصل إلى القاع (افترض أن تدرحج الكرة أملس وأن فواقد الاحتكاك مهملة) .

طريقة الحل : يحل هذا النوع من المسائل بمنتهى السهولة باستخدام نظرية الشغل والطاقة . نعلم أن :

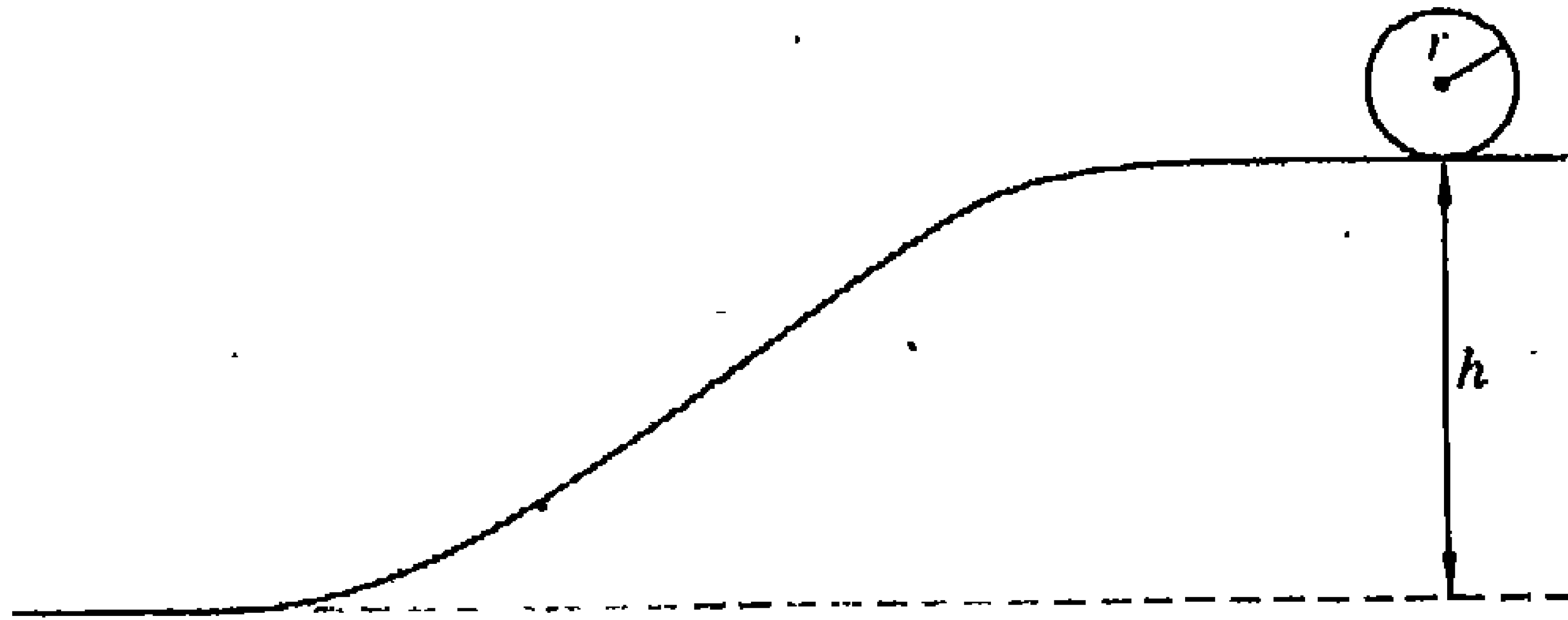
$$\text{طاقة الوضع المفقودة + طاقة الحركة المفقودة} = \text{work}_{inc} - \text{work}_{dec}$$

وحيث أن الشغل المبذول فى هذه الحالة هو شغل تثاقلى ، فإن هذه المعادلة تتحول الى الصورة :

طاقة الوضع المفقودة + طاقة الحركة الدورانية المفقودة + طاقة الحركة الانتقالية المفقودة = O

أى أن

$$(0 - \tfrac{1}{2}mv^2) + (0 - \tfrac{1}{2}I\omega^2) + mgh = 0$$



شكل (٨ – ٢٢)
عندما تتدحرج الكرة الى قاع التل تتحول طاقة وضعها الى طاقة حركة دورانية وطاقة حركة انتقالية .

حيث v و ω هما السرعتان الخطية والزاوية عند القاع . ولكننا نعلم من الجدول ٨ – ١ أن عزم القصور الذاتى للكرة هو $I = \frac{2}{5}mr^2$ اذن :

$$mgh = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{5}mr^2\omega^2$$

لاحظ أن الكتلة تختصر من الطرفين ، ولهذا فإنها ليست مهمة فى هذه الحالة .

وإذا تذكرنا أن $v = r\omega$ ، يمكننا أن نجد مباشرة أن :

$$gh = \tfrac{1}{2}v^2 + \tfrac{1}{5}v^2$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة الى v نحصل على :

$$v = \sqrt{\frac{10\,gh}{7}}$$

من المهم أيضا أن نلاحظ أن نصف قطر الكرة يختصر أيضا . علاوة على ذلك تتحول معظم الطاقة فى النهاية الى طاقة انتقالية كما نرى من العلاقة الأولى المعطاة عاليه :

$$mgh = \tfrac{1}{2}mv^2 + (\tfrac{1}{2})(\tfrac{2}{5})(mv^2)$$

واذا كان الجسم المتدحرج طوقا فإن المعامل $2/5$ سيستبدل بالوحدة ، وفى هذه الحالة ستكون طاقة الحركة الدورانية نصف الطاقة النهائية .

٨ – ١٠ بقاء كمية التحرك الزاوى

بناء على التشابهات الكثيرة بين الظواهر الخطية والدورانية والتى وجدناها حتى الآن ، لايجب أن ندهش من أن هناك نظيرا دورانيا لكمية التحرك الخطى . وترتبط كمية التحرك الدورانى أو الزاوى بحقيقة أن الجسم الدوار يستمر فى الدوران .

تعريف

وكما هو متوقع من حقيقة أن كمية التحرك الخطى تعطى بالكمية mv ، فإن معادلة تعريف كمية التحرك الزاوى يجب أن تكون كالتالى :

كمية التحرك الزاوى $= I\omega$ (٨ – ١٣) كمية التحرك الزاوى

وتتبع كمية التحرك الزاوى لجسم أو مجموعة من الأجسام قانون بقاء يشبه كثيرا قانون بقاء كمية التحرك الخطى . ويمكن صياغة هذا القانون كالتالى :

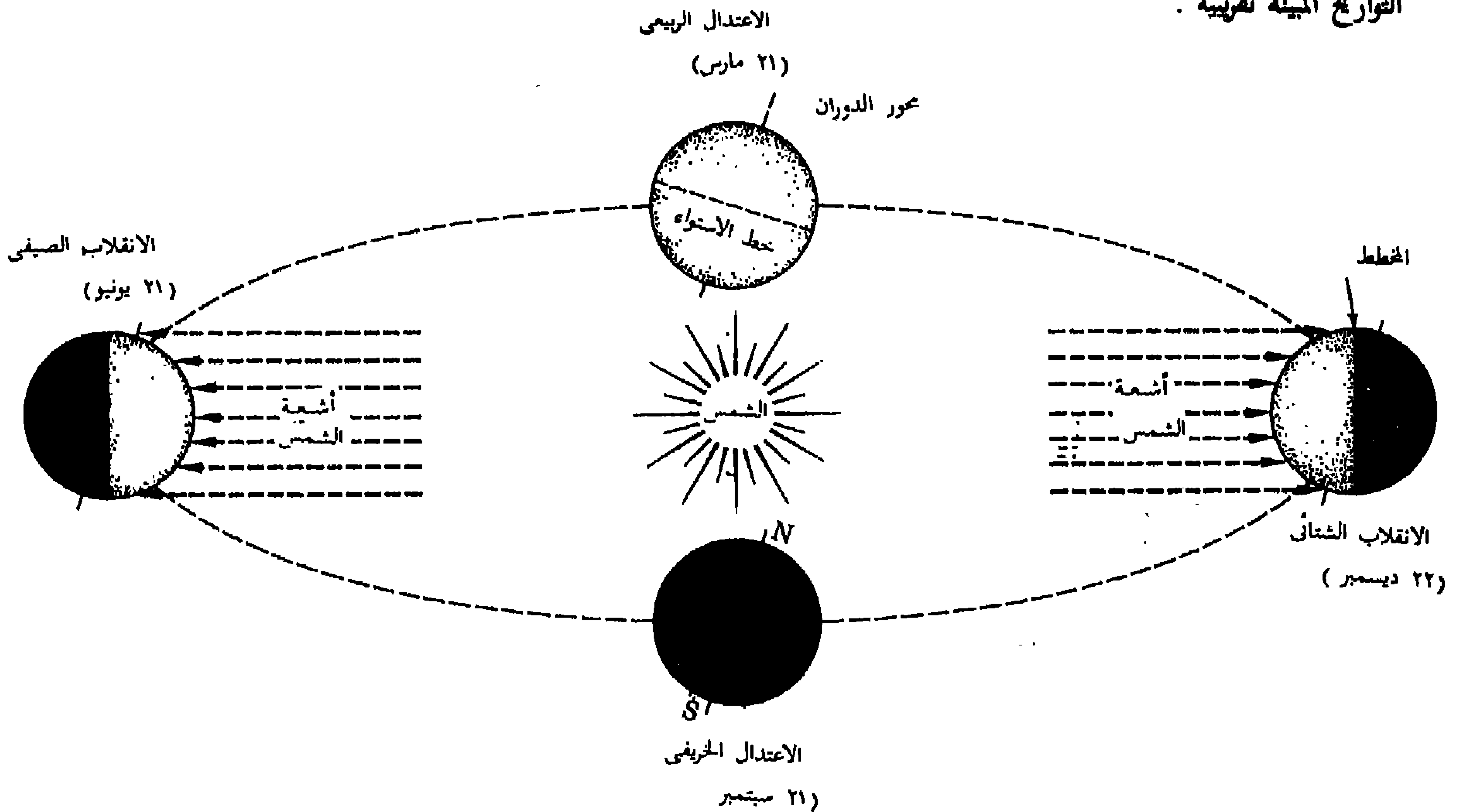
قانون بقاء كمية التحرك الـــزاوى

تظل كمية التحرك الزاوى لجسم أو مجموعة من الأجسام ثابتة مالم تؤثر عليها عزوم دوران خارجية ، وعندئذ سوف يستمر الجسم أو مجموعة الأجسام فى الدوران حول نفس المحور بدون أى تغير .

ويسمى هذا القانون بقانون **بقاء كمية التحرك الزاوى** . لاحظ أن القانون لاينص فقط على أن ω ستظل ثابتة للجسم المعزول . ولكنه ينص أيضا على أن اتجاه المحور الذى يدور الجسم حوله يستمر بدون تغيير . ويحكم هذا القانون عمل الجيروسكوبات الموازية والأجهزة المماثلة . فمثلا ، إذا اديرت عجلة كبيرة حول محور شمالى – جنوبى ، فإن العجلة لن تغير إتجاهها بسهولة مالم تسلط عليها قوى كبيرة جدا . وعندما يسلط عزم دوران على مثل هذا النظام الدوار ، فإن حركة النظام نتيجة لذلك تمثل أهمية خاصة لأنها تبدو معارضة لما يتوقع المرء حدوثه . وبالرغم من أن تحليل هذه الظواهر أكثر تعقيدا من أن نتتبعه فى هذا المقرر الدراسى ، فإن من السهل توضيح هذه التأثيرات ويمكن للمدرس أن يعطى بعضا منها .

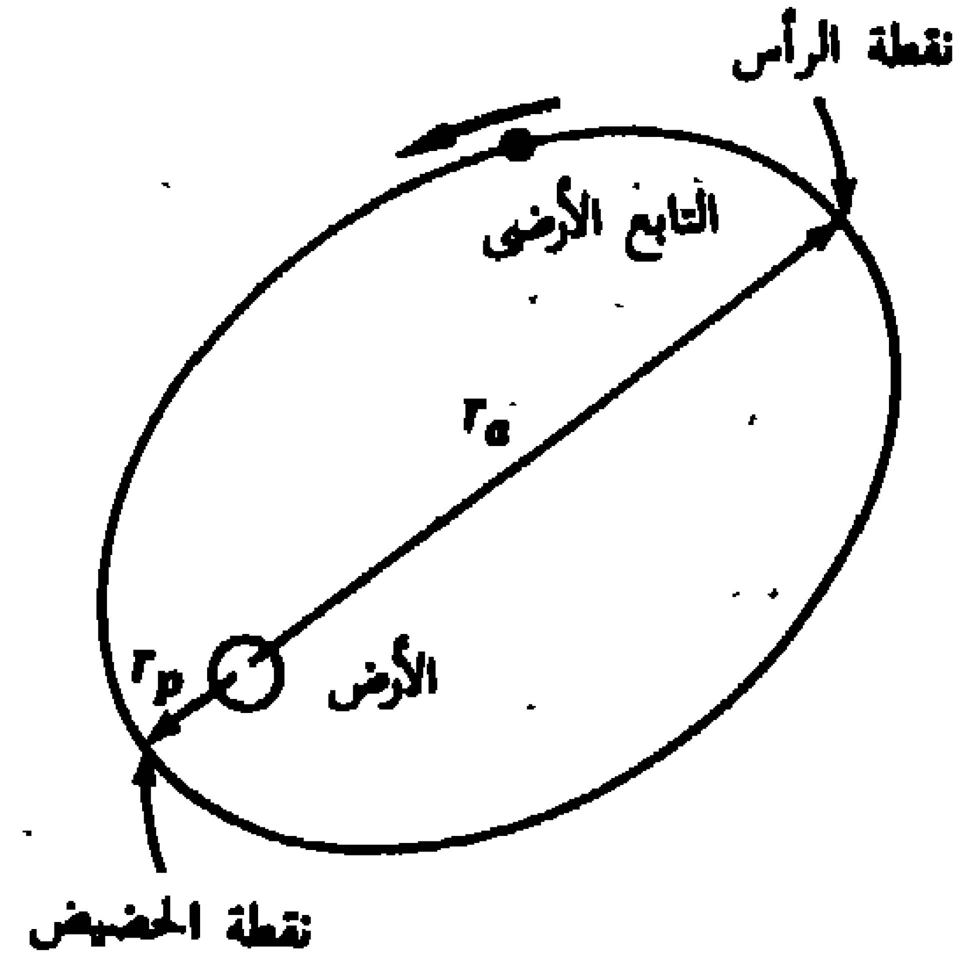
إذن ، لايغير محور دوران جسم إتجاهه مالم يجبره عزم دوران خارجى على عمل ذلك . وهذه الحقيقة ذات أهمية كبيرة بالنسبة لدوران الأرض حول الشمس . وفى الحقيقة فإن الأرض تقع تحت تأثير أى عزم دوران محسوس لأن القوة الرئيسية المؤثرة عليها ، وهى جذب الشمس ، هى قوة نصف قطرية . لذلك فإن محور دوران الأرض يظل ثابت الاتجاه بالنسبة للكون المحيط بها . أى بالنسبة للنجوم البعيدة . ويمكننا أن نرى هذا السلوك فى الشكل ٨ – ٢٣ .

شكل (٨ – ٢٣)
يعتبر احتفاظ محور دوران الأرض باتجاهه ثابتا بالنسبة لباقى الكون، مثالا لقانون بقاء كمية التحرك الزاوى . التواريخ المبينة تقريبية .



لاحظ أن مسار الأرض حول الشمس دائرى تقريبا . ولكن محور دوران الأرض ليس عموديا على المستوى الذى يحدده هذا المدار ، ولكنه يصنع زاوية ثابتة مع هذا المدار . ونظرا لبقاء كمية التحرك فإن اتجاه محور الدوران لايتغير أثناء دوران الأرض حول الشمس . وكما يمكنك أن ترى من الشكل ، يستمر القطب الشمالى للأرض باستمرار فى ضوء الشمس طوال الصيف (يوليو) . وفى منتصف الشتاء (يناير) يتواجد القطب الشمالى فى ظلام دائم . والطبع فإن العكس صحيح بالنسبة للقطب الجنوبى . وتعتبر الفصول التى نشاهدها نحن مثالا أقل ادهاشا لنفس الظاهرة .

يمكننا أيضا أن نرى أمثلة كثيرة أخرى لبقاء كمية التحرك الزاوى فى الكون المحيط بنا . وتستخدم هذه الحقيقة فى التنبؤ بدوران الكواكب فى مداراتها وحركة النجوم فى السماء . وهذا القانون نفسه ذو أهمية كبيرة فى تعيين سلوك الذرات فى الجزيئات وسلوك الالكترونات فى الذرات . وفى الحقيقة فإن مجال هذا القانون غير محدد ، فهو ينطبق على أصغر الأجسام كما ينطبق على أكبر الأجسام فى الكون .



شكل (٨ — ٢٤) اوجد النسبة بين سرعتى التابع الأرضى عند نقطة الحضيض ونقطة الرأس .

مثال توضيحى ٨ — ١٣ : اعتبر التابع الأرضى الذى يدور حول الأرض كما هو مبين فى الشكل ٨ — ٢٤ . اوجد النسبة بين سرعتيه عند نقطة الحضيض ونقطة الرأس .

طريقة الحل : يدور التابع حول الأرض فى قطع ناقص تقع الأرض فى إحدى بؤرتيه . وحيث أن القوة التى تؤثر بها الأرض على التابع قوة نصف قطرية،فإن كمية التحرك الزاوى للتابع حول مركز الأرض كمحور لابد أن تكون محفوظة . فإذا رمزنا لنقطة الحضيض بالرمز p ولنقطة الرأس بالرمز a فإن قانون بقاء كمية التحرك الزاوى يخبرنا أن :

$$I_p\omega_p = I_a\omega_a$$

ولكن عزم القصور الذاتى لكتلة نقطية m (التابع الأرضى) حول محور دوران يقع على بعد r منها هو mr^2 . اذن تتحول هذه العلاقة الى :

التى تعطى

$$mr_p^2\omega_p = mr_a^2\omega_a$$

$$\frac{\omega_p}{\omega_a} = \left(\frac{r_a}{r_p}\right)^2$$

نعلم أن $v_T = \omega r$. وحيث أن السرعة مماسية عند نقطة الحضيض ونقطة الرأس ، ينتج إذن أن :

$$\frac{v_p/r_p}{v_a/r_a} = \left(\frac{r_a}{r_p}\right)^2$$

التى يمكن تبسيطها الى الصورة :

$$\frac{v_p}{v_a} = \frac{r_a}{r_p}$$

مثال توضيحى ٨ – ١٤ : تدور الأرض حول محورها مرة واحدة فى كل يوم . افترض أن الأرض قد انكمشت بطريقة ما بحيث اصبح نصف قطرها مساويا لنصف قيمته فى الوقت الحاضر . بأى سرعة سوف تدور الأرض فى هذه الحالة ؟

طريقة الحل : لنفرض كتقريب أن الأرض منتظمة الكثافة فى كل حالة . عندئذ سوف يتغير عزم القصور الذاتى للأرض من $I_0 = \frac{2}{5}MR_0^2$ الى $I_f = \frac{2}{5}MR_f^2$. ، حيث M هى كتلة الأرض. $R_0 = 2R_f$.

وحيث أنه لايؤثر أى عزم دوران على الأرض أثناء عملية الانكماش ، فان كمية التحرك الزاوى يجب أن تكون محفوظة . اذن :

$$I_0\omega_0 = I_f\omega_f$$

حيث $\omega_0 = 1$ rev/day ، ω_f هى سرعة الدوران النهائية . وبالتعويض عن قيمتى I_0 و I_f نجد أن :

$$\frac{2}{5}MR_0^2\omega_0 = \frac{2}{5}M\frac{1}{4}R_0^2\omega_f$$

ومنه نجد أن :

$$\omega_f = 4\omega_0 = 4 \text{ rev/day}$$

أى أن طول اليوم سوف ينقص الى ست ساعات .

ملخص

* مركز ثقل الجسم هو النقطة التى يمكننا اعتبار أن وزن الجسم يؤثر عليها . فى جميع الحالات تقريبا يمكننا أن نعتبر أن مركز الثقل ومركز الكتلة متطابقين . من الممكن أن نفترض أن كتلة الجسم بأكملها موجودة فى مركز الكتلة عند دراسة انتقال الجسم الذى تسببه قوى خارجية .

* قياس التأثير الدورانى لقوة ما بعزم الدوران τ الناتج عن هذه القوة . عزم الدوران حول محور معين هو القوة مضروبة فى ذراع رافعتها . ذراع الرافعة هو طول العمود الساقط من المحور على خط القوة .

* لكى يتحقق توازن الجسم يجب أن يتحقق الشرطان الآتيان :

$$\Sigma\tau = 0 \quad \text{و} \quad \Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$$

عند جمع عزوم الدوران تعتبر عزوم الدوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة موجبة وعزوم الدوران فى اتجاه عقارب الساعة سالبة . تستخدم طريقة مكونة من خمس خطوات فى حل مسائل التوازن ، وقد أعطيت هذه الخطوات الخمس فى الجزء ٨ - ٣ .

* عند كتابة معادلة عزم الدوران لموقف توازن،يمكن أن يؤخذ المحور فى أى مكان مناسب . يؤخذ المحور عادة بحيث يمر خط قوة مجهولة خلاله،وبهذه الطريقة لن تظهر القوة المجهولة فى معادلة عزم الدوران .

يمكن وصف التوازن الإستاتى بأنه توازن (١) مستقر ، (٢) غير مستقر ، (٣) متعادل حسب ماإذا كان الإضطراب الصغير يسبب (١) زيادة ، (٢) نقصا ، (٣) لايسبب أى تغير فى طاقة وضع الجسم ، على الترتيب .

يسبب عزم الدوران الخارجى تسارعا للجسم طبقا للمعادلة $\tau = I\alpha$.تقيس الكمية I القصور الذاتى الدورانى للجسم حول نفس المحور المأخوذ لعزم الدوران . وتسمى هذه الكمية عزم القصور الذاتى للجسم وتعطى بالعلاقة $I = \Sigma m_i r_i^2$ ، أو بدلالة الكتلة الكلية M للجسم $I = MK^2$، حيث K نصف قطر الحركة التدويمية . قيم I لبعض الأجسام البسيطة معطاه فى الجدول ٨ - ١ .

الجسم الدوار له طاقة حركة دورانية تساوى $\frac{1}{2}I\omega^2$. طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك حركة انتقالية ودورانية فى نفس الوقت هى $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$. فى هذا التعبير v و I تشيران الى مركز الكتلة .

كمية التحرك الزاوى لجسم دوار هى $I\omega$. ينص قانون بقاء كمية التحرك الزاوى - فى غياب عزوم الدوران المؤثرة على النظام - على أن كمية التحرك الزاوى للنظام ثابتة . وهذا لايعنى أن مقدار كمية التحرك الزاوى فقط هى التى تظل ثابتة ، بل أيضا اتجاه محور الدوران .

الحد الأدنى من الاهداف التعليمية :

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١* - إيجاد مركز الثقل ومركز الكتلة لجسم بسيط منتظم كالكرة والطوق والقضيب والمكعب ... الخ .

٢* - اجراء تجربة عملية لإيجاد موضع مركز أى جسم جاسىء بسيط غير منتظم الشكل .

٣* - ايجاد ذراع الرافعة لقوة معينة بالنسبة الى محور معين .

٤* - حساب عزم الدوران حول محور معين نتيجة لقوة معينة .

٥* - صياغة الشرطين اللازمين للتوازن بالألفاظ وفى صورة معادلة رياضية .

٦* - حل المسائل البسيطة المتعلقة بالتوازن كالأمثلة التى سبق ذكرها فى الأمثلة التوضيحية من ٨ - ٤ الى ٨ - ٩ .

٧* - توضيح ماإذا كان جسم معين فى حالة توازن مستقر أو غير مستقر أو متعادل .

٨ – كتابة عزم القصور الذاتى لكتلة نقطية m حول محور يبعد عنها مسافة قدرها r . صياغة كيف ترتبط هذه النتيجة بتعريف عزم القصور الذاتى لجسم معقد بالكلمات .

٩ – ايجاد إحدى الكميات الآتية إذا كان جميع الكميات الأخرى معلومة : M، I، K .

١٠ – كتابة النظير الدورانى للعلاقة $F = ma$ وتعريف كل كمية فيه . استخدام هذه العلاقة لحل مسائل التسارع الدورانى البسيطة كالأمثلة التوضيحية من ٨ – ١٠ و ٨ – ١١ .

١١ – كتابة صيغة طاقة الحركة الدورانية .

١٢ – ايجاد طاقة الحركة الكلية لجسم بمعلومية نصف قطره وسرعته وعزم القصور الذاتى I له .

١٣ – حل المواقف البسيطة المتعلقة بنظرية الشغل والطاقة فى حالة الأجسام الدوارة ، وقد أعطينا بعضا منها فى المثال التوضيحى ٨ إلى ١١ والمسائل من ١٩ – ٢١ .

١٤ – كتابة قانون بقاء كمية التحرك الزاوى وكتابة صيغة كمية التحرك الزاوى . استخدام هذا القانون فى حل المسائل البسيطة كالمعطاه فى الأمثلة التوضيحية ٨ – ١٣ و ٨ – ١٤ .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

* مركز الثقل ، مركز الكتلة
* ذراع الرافعة
* عزم الدوران
* الشرط الثانى للتوازن
* موضع المحور اختيارى
* أنواع التوازن الاستاتى الثلاثة .

عزم القصور الذاتى $I = \Sigma m_i r_i^2$

نصف قطر الحركة التدويمية $I = MK^2$

$\tau = I\alpha$

طاقة الحركة الدورانية : $\frac{1}{2}I\omega^2$

طاقة الحركة الكلية = طاقة الحركة الدورانية + طاقة الحركة الانتقالية

كمية التحرك الزاوى : $I\omega$

قانون بقاء كمية التحرك الزاوى

اسئلة وتخمينات :

١* – افترض أن لديك خيطا ومسطرة طولها متر وكتلة قدرها 1 kg وكتلة مجهولة فى حدود بضعة كيلوجرامات . كيف يمكنك تعيين الكتلة المجهولة باستخدام أساسيات هذا الفصل ؟

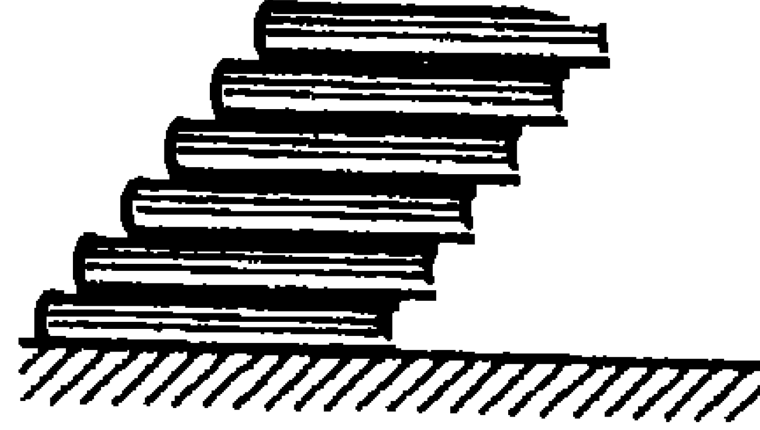
٢* – هناك طريقة صحيحة وأخرى خاطئة لرفع ثقل كبير . ارجع الى الشكل ٨ – ١٢ واستخدمه فى شرح لماذا تعتبر الطريقة المبينة خاطئة . ماهى الطريقة الصحيحة ؟ إشرح .

٣* - باستخدام الرسم التخطيطى والمعطيات المبينة فى شكل ٨ - ١٠ ، اشرح لماذا يكون من الأسهل أن تحمل سطلا من الماء فى يدك معلقة بجانبك عن أن تحمله فى يدك الممتدة أفقيا ؟

٤* - قف بحيث تكون قدماك ملتصقتان معا وجسمك صلبا وحاول أن تميل بزاوية قدرها θ على الرأس . لاحظ أن θ يجب أن تكون صغيرة لكى تتمكن من الاحتفاظ باتزانك . اشرح ماذا يحدد مقدار الزاوية . لماذا يتمكن ذوو الأقدام الكبيرة من الميل أكبر من غيرهم ؟

٥* - يقال أن الاشخاص الرشيقين أقل عرضة لآلام الظهر من البدينين . اشرح كيف يؤثر هذا العامل على وضع الجلسة وانفعال العضلة وماشابه ذلك .

٦* - وضع عدد كبير من الكتب كل فوق الآخر بإزاحات منتظمة كما هو مبين فى الشكل م ٨ -١ . ناقش شروط توازن هذا الكوم من الكتب أو عدم توازنه .



شكل م ٨ - ١

٧* - يراد حصاد تل شديد الانحدار باستخدام حصادة مروج يقودها شخص راكب عليها أو جرار . تحت أى الشروط يكون ذلك آمنا ؟ كرر العمل فى حالة الهبوط من التل وكرره فى حالة القيادة جانبيا على التل . عند الاجابة على هذا السؤال يجب أن تقدر موضع مركز ثقل الحصادة والقائد . لماذا ؟

٨* - من المعتاد فتح الباب المغلق بوضع سفين خشبى فى الشق بالقرب من المفصلة مباشرة . لماذا يؤدى ذلك عادة الى تدمير المفصلة ؟

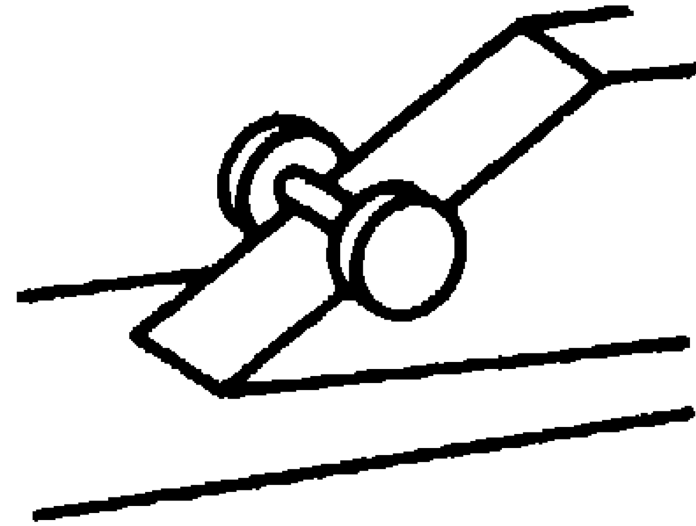
٩ - أى عجلتى الدراجة أسهل فى ايقاف دورانها حول محورها ، العجلة ذات الاطار المملوء بالهواء أو العجلة ذات الاطار المملوء بالماء ؟

١٠ - ايهما يتحرك بسرعة أكبر بعد التدحرج الى أسفل على نفس المستوى المائل ، الكرة أو الطوق اذا كانت كتلتيهما ونصفا قطريهما متساويين ؟ إشرح . ناقش حالة طوق وقرص متساويين فى الكتلة ونصف القطر .

١١ - افترض أن جذب الشمس للأرض قد تضاعف فجأة . ماذا يمكنك أن تقول عن معدل دوران الأرض وعن مدارها حول الشمس ؟

١٢ - افترض أن انفجارا داخليا قد فتح فجأة فجوة ضخمة فى الأرض بدفع سطحها الى الخارج . ماتأثير ذلك على دوران الأرض حول محورها وحول الشمس ؟

١٣ - نصر على أن كمية التحرك الزاوى محفوظة . هل لايتعارض ذلك مع حقيقة أن جميع الاجسام الدوارة تقريبا تبطىء وتتوقف فى نهاية الأمر ؟



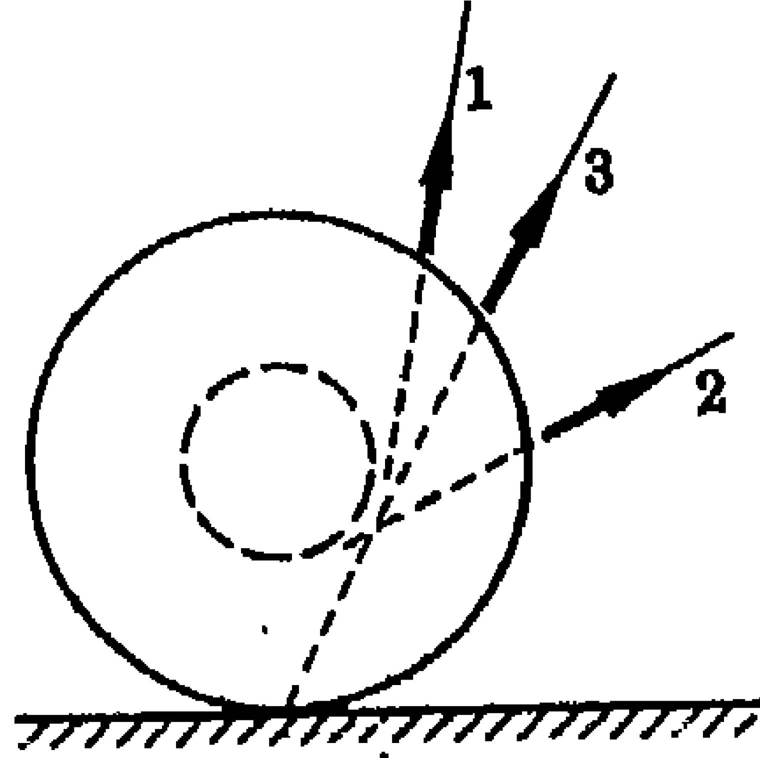
شكل م ٨ - ٢

١٤ - يمثل الشكل م ٨ - ٢ مكبا (ملف خيط) متدحرجا الى أسفل على مستوى مائل . وبمجرد أن يتلامس القرصان الكبيران الموجودان على جانبى المكب مع الأرضية ينطلق المكب بسرعة انتقالية كبيرة . إشرح لماذا يحدث ذلك موجها اهتماما خاصا لطريقة توزيع طاقة الحركة .

١٥ - يتحرك المكب (ملف الخيط) المبين فى الشكل م ٨ - ٣ الى اليسار عندما يكون الخيط فى الوضع 1 ، ويتحرك الى اليمين عندما يكون الخيط فى الوضع 2 لماذا ؟ ماذا يحدث عندما يكون الخيط فى الوضع 3 ؟

١٦ – أى كسر بالتقريب تمثله طاقة الحركة الدورانية لعجلات سيارة تتدحرج الى أسفل على تل من طاقة الحركة الكلية ؟ (ق)

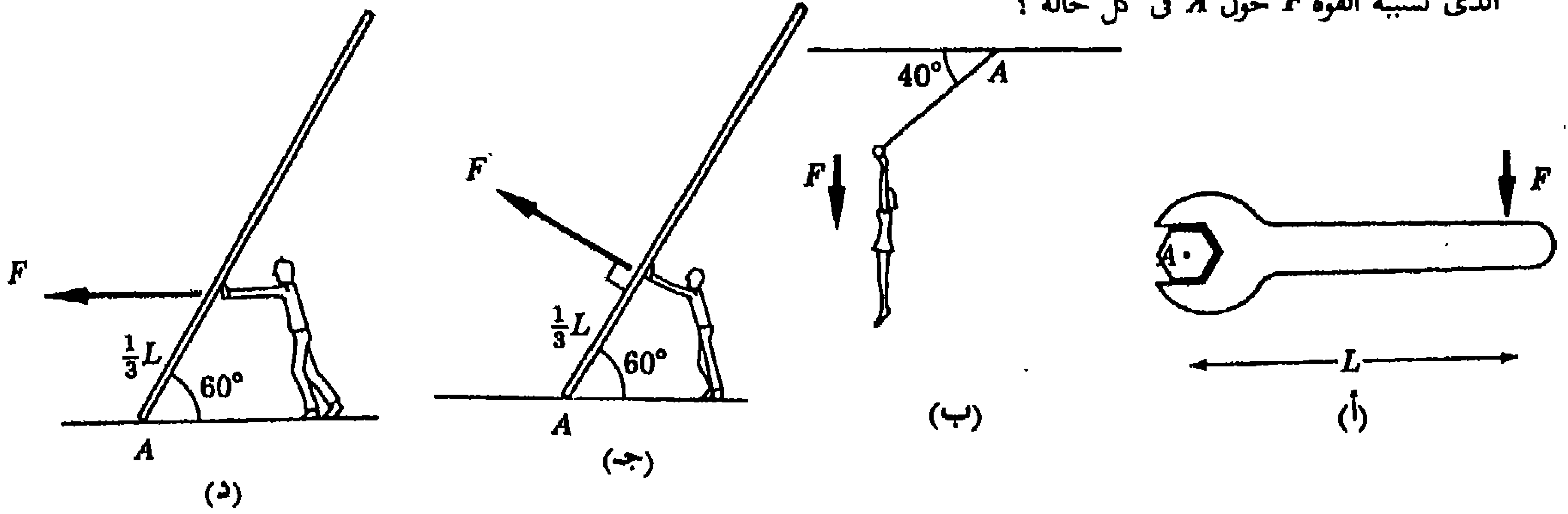
١٧ – تتحرك سيارة الى الشرق فى طريق سريع يمتد شرقا وغربا ، وتتسارع السيارة من السكون الى سرعتها القصوى . هل تزيد سرعة دوران الأرض أو تنقص نتيجة لذلك ؟ قدر التغير الجزئى فى سرعة دوران الأرض . (ق)



شكل م ٨ – ٣

مسائل

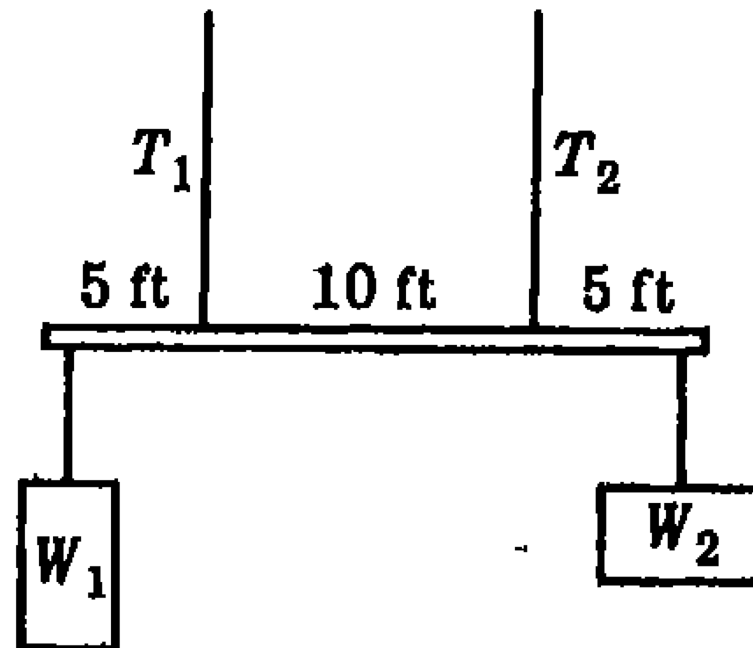
١* – ارجع الى الشكل م ٨ – ٤ . (أ) اوجد ذراع الرافعة للقوة F فى كل حالة إذا أخذت النقطة A كمحور . (ب) ماهو عزم الدوران الذى تسببه القوة F حول A فى كل حالة ؟



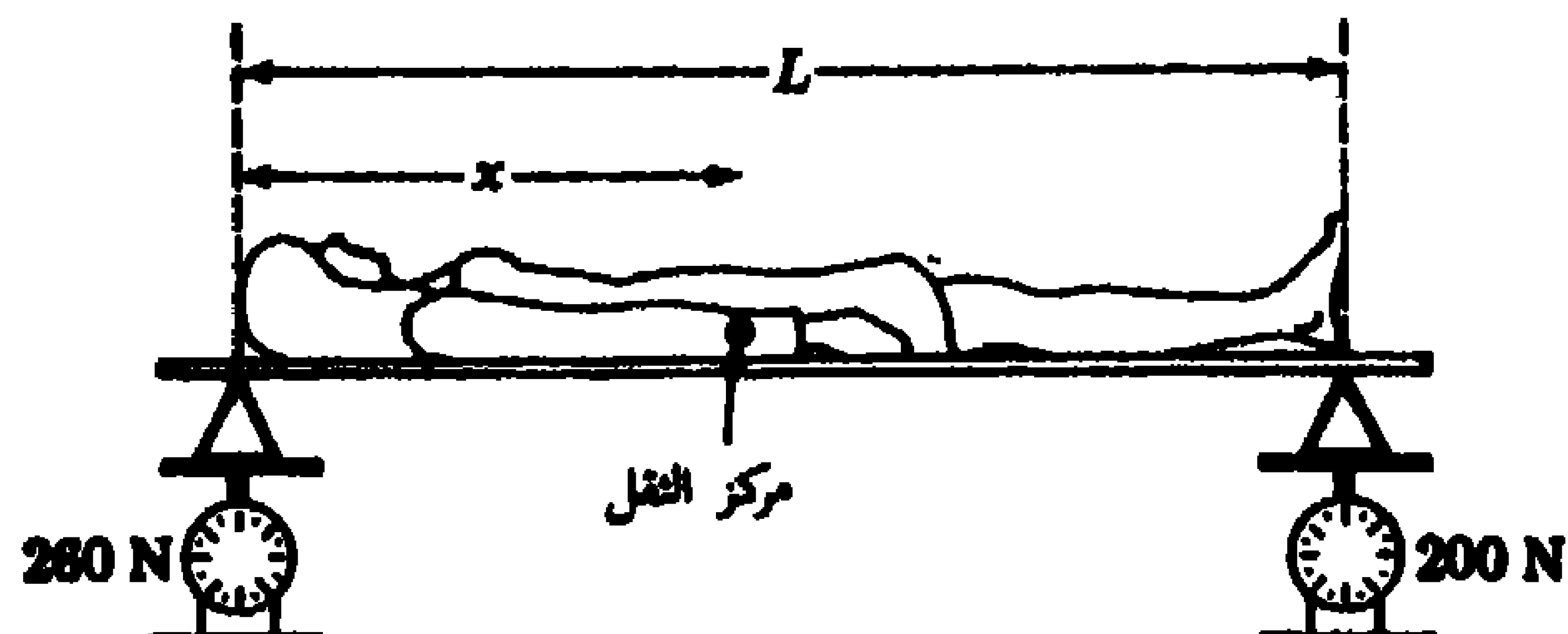
شكل م ٨ – ٤

٢ – الحبلان الرأسيان المبينان فى شكل م٨ – ٥ يحملان لوحا خشبيا ثخينا منتظما وزنه 50lb والأوزان المبينة . فإذا كانت $T_1 = 80$ lb و $W_2 = 100$ lb ، فاوجد قيمة كل من W_1 ، T_2 .

٣* – يحمل الحبلان الرأسيان المبينان فى الشكل م ٨ – ٥ لوحا خشبيا ثخينا منتظما وزنه 50 lb وثقلين كما هو مبين . فاذا كان كل من الحبلين يمكن أن يتحمل شدا قدره 200 lb فقط ، واذا كان W_2 ضعف W_1 فما هى أكبر قيمة للثقل W_1 ؟ (افترض أن الحبلين الذين يحملان W_1 و W_2 قويان جدا . تحذير : T_1 لايساوى T_2 . أيهما يساوى 200 lb ؟) .

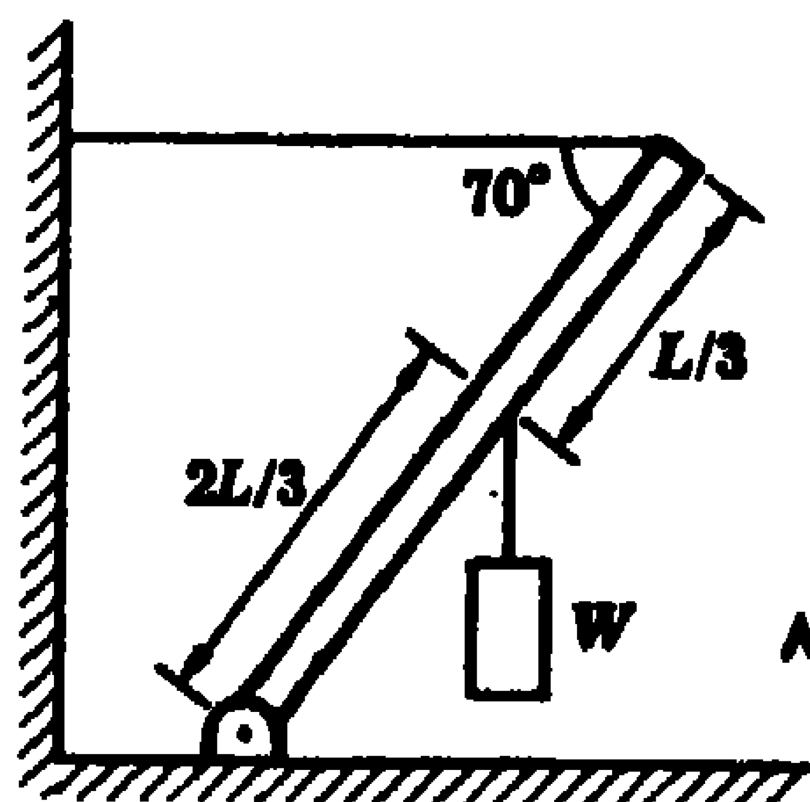


٤ – لتعيين موضع مركز ثقل شخص ما يوضع هذا الشخص على ميزانين كما هو مبين فى الشكل م ٨ – ٦ . إفترض أن قراءة الميزان الأيمن هى 200 N . أوجد المسافة x المبينة فى الرسم بدلالة L . إفترض أن قراءتى الميزانين قد صححتا بطرح قراءتى الميزانين عندما لم تكن السيدة فى مكانها .

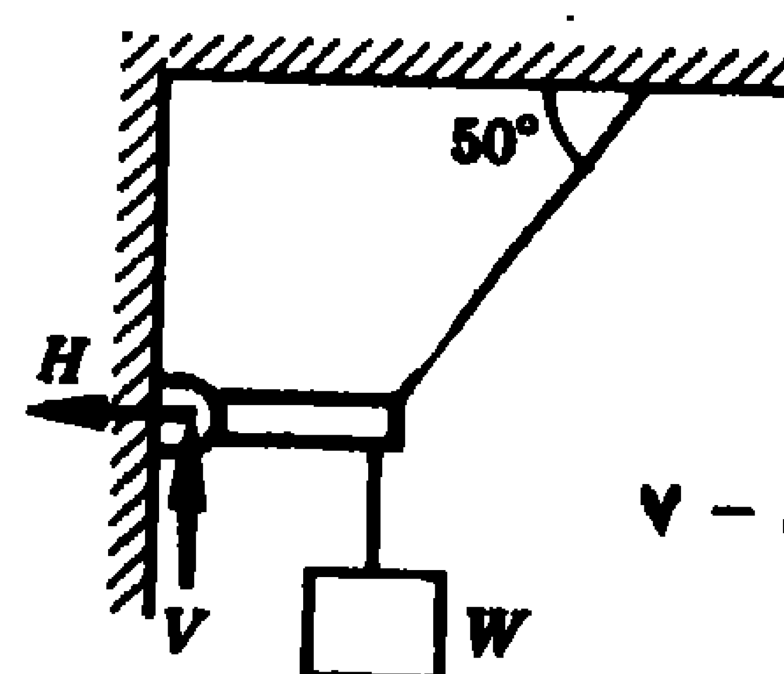


شكل م ٨ – ٦

٥* – العمود المبين فى الشكل م ٨ – ٧ منتظم ووزنه 200 N . إوجد (أ) الشد فى الحبل ، (ب) مركبتى القوة H و V التى يؤثر بها الدسار (المسمار) على الحائط اذا كان W = 800 N .



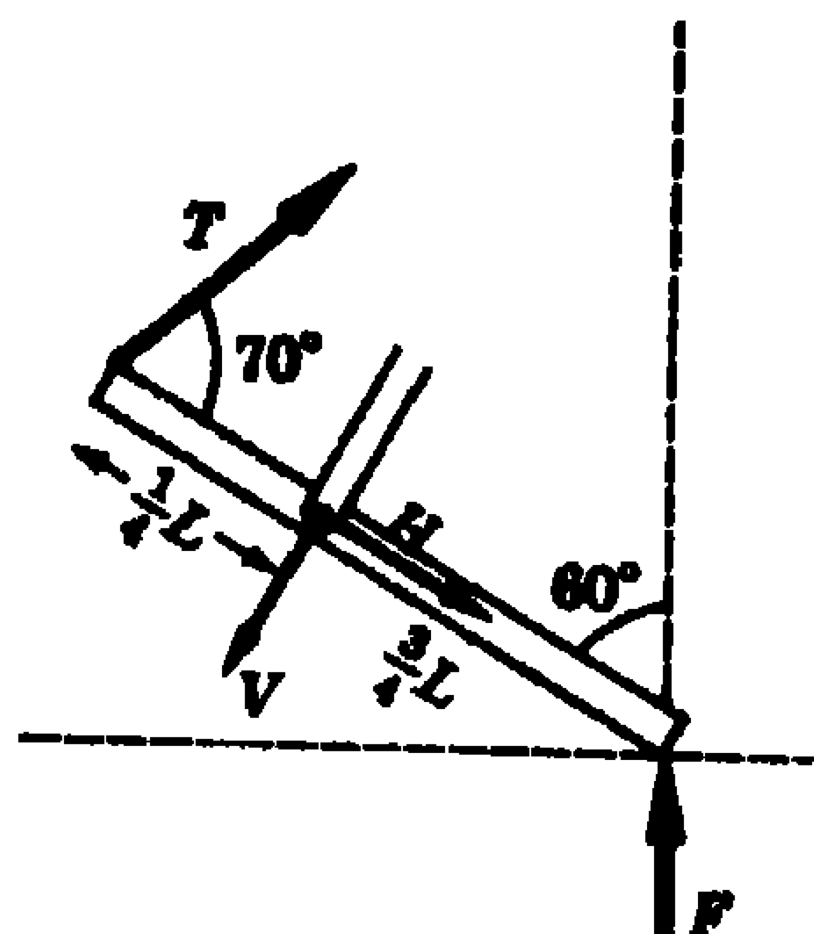
شكل م ٨ – ٨



شكل م ٨ – ٧

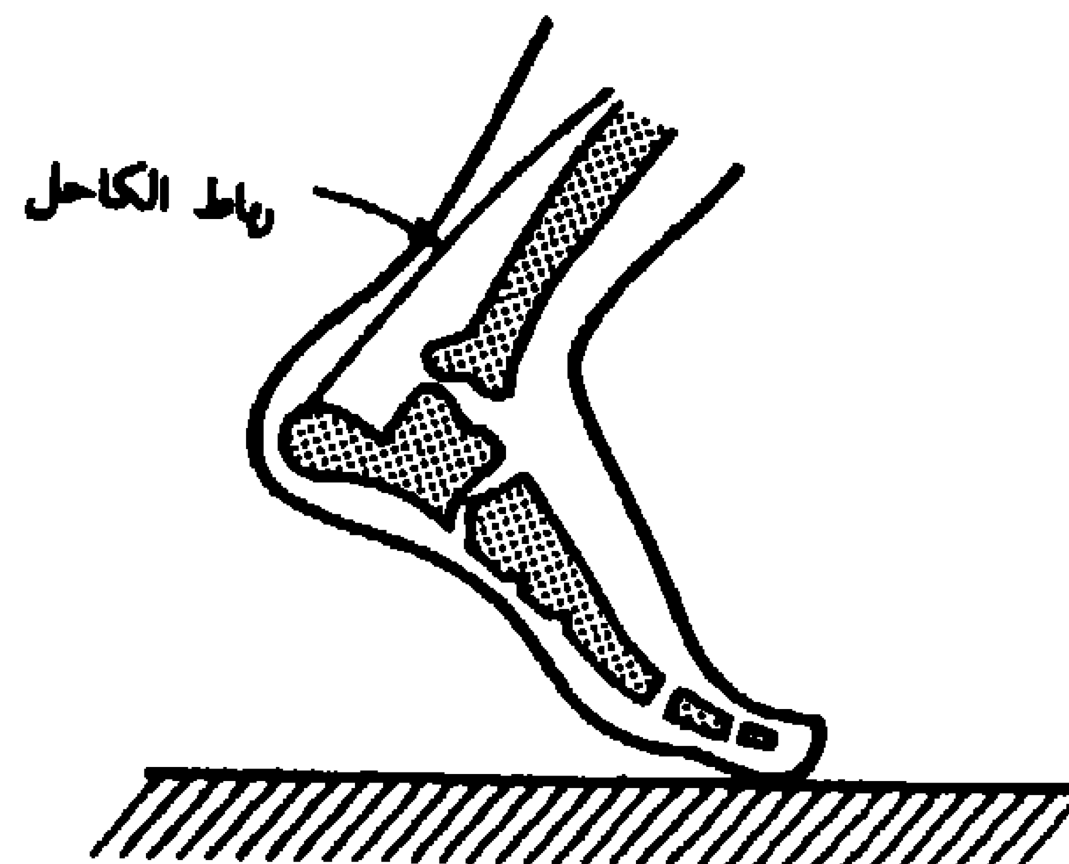
٦* – يحمل عمود منتظم وزنه 500 N ثقلا كما هو مبين فى الشكل م ٨ – ٨ . (أ) ماهى أكبر قيمة للثقل اذا كان الحبل الافقى قادرا على حمل 2000 N ؟ (ب) ماهما مركبتا القوة عند قاعدة العمود ؟

٧** – عندما يقف شخص على رأس إصبع القدم يبدو هذا الموقف شبيها بما هو مبين فى الشكل م ٨ – ٩ . ويمكننا استبدال الموقف الحقيقى بالنموذج المبين فى الجزء ب . وإذا كان الشخص يقف على قدم واحدة فإن القوة F ، أى الدفع على الأرضية ، مساوية لوزن الشخص . إوجد (أ) الشد فى رباط الكاحل ، (ب) H و V عند الكاحل بدلالة F للموقف الموضح .



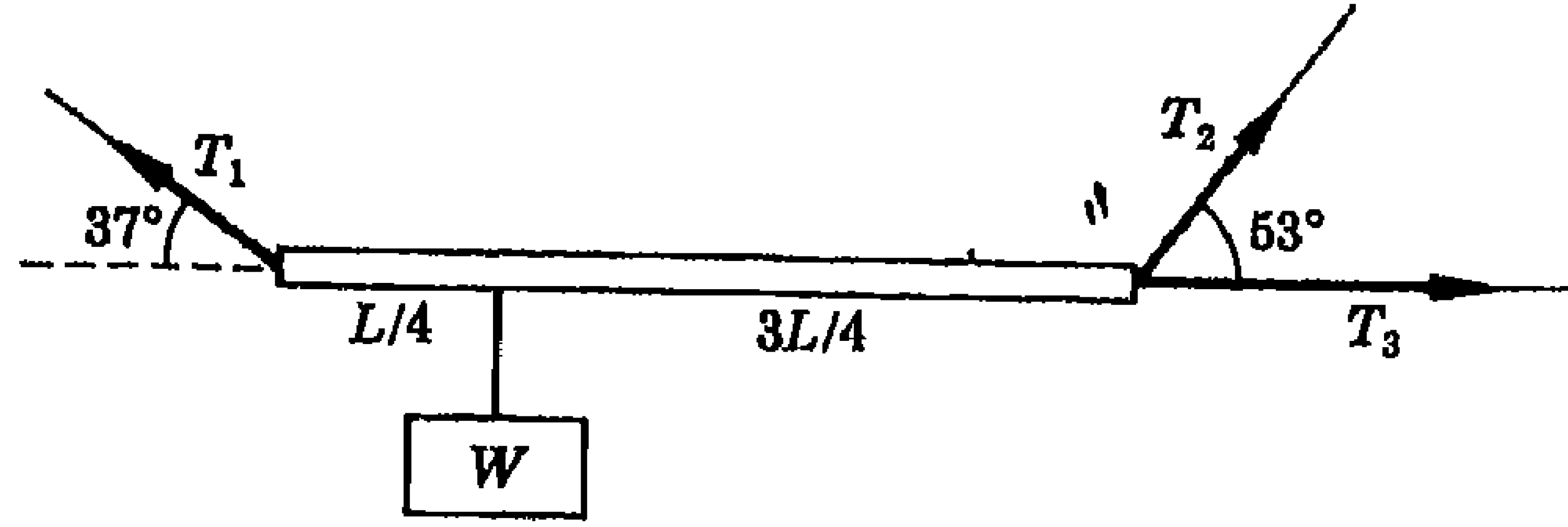
(ب)

شكل م ٨ – ٩



(أ)

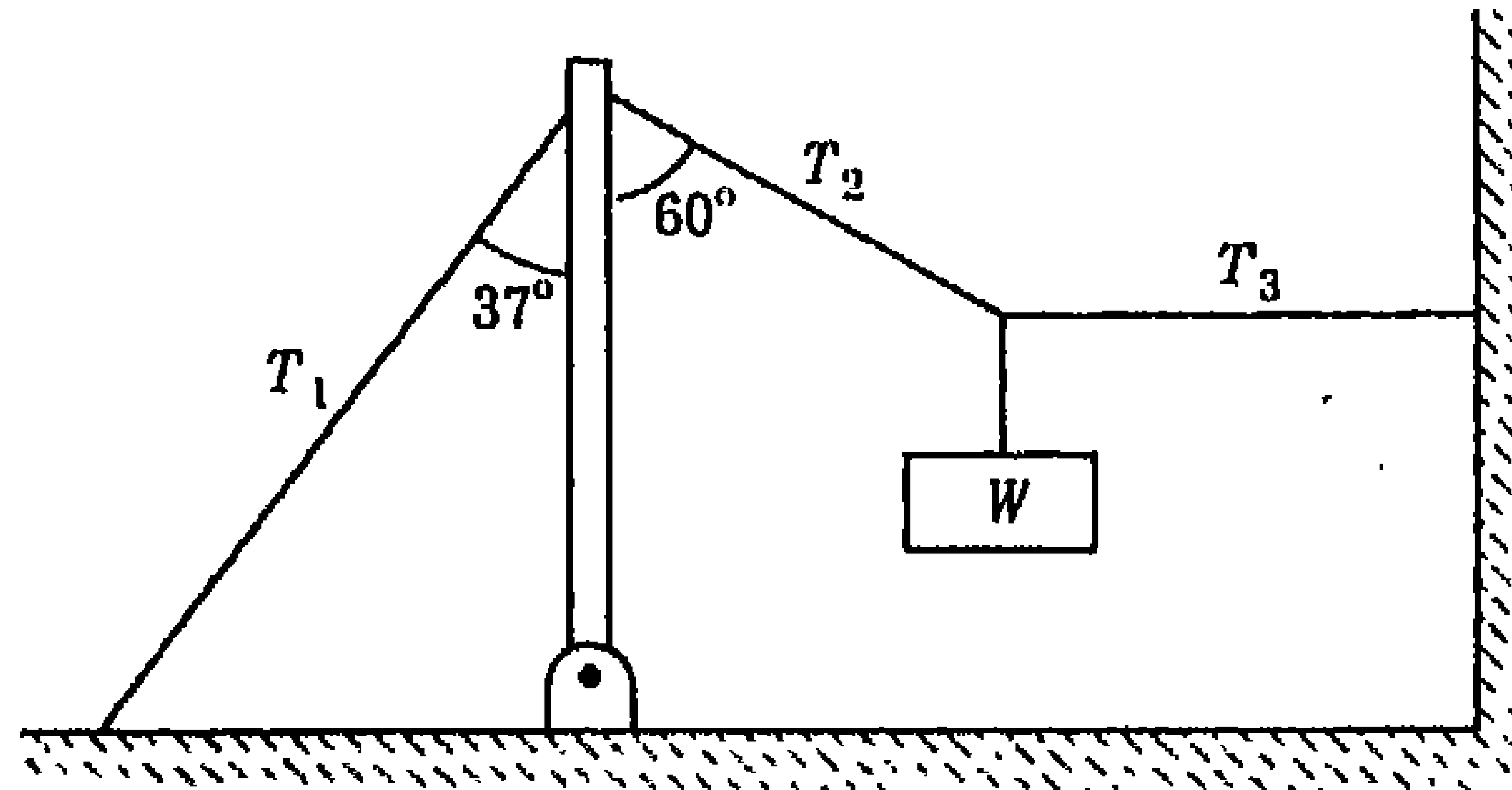
٨* – يحمل لوح خشبى وزنه 120 N ثقلا مقداره $W = 700$ N كما هو مبين فى الشكل م ٨ – ١٠ إوجد الشد فى كل من الحبال الثلاثة الحاملة .



شكل م ٨ – ١٠

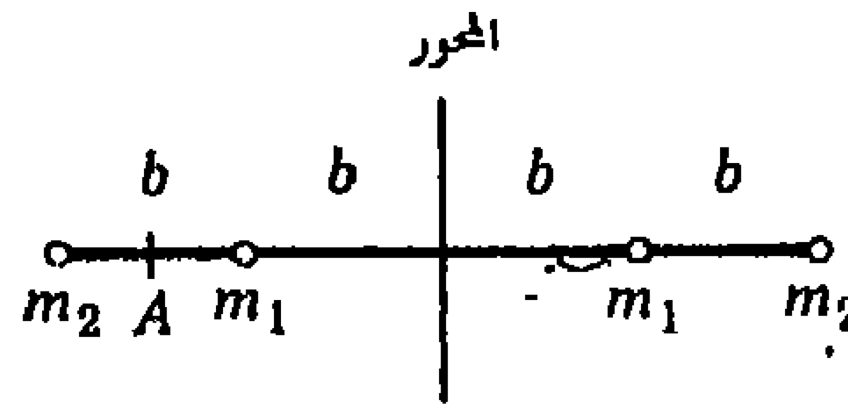
٩** – فى الشكل م ٨ – ١١ وزن العمود 750 N وقيمة T_3 هى 870 N إوجد T_1 ، T_2 ، W والقوة التى يدفع بها العمود الدسار اللاحتكاكى عند قاعدته إلى أسفل .

١٠ – ماهو عزم القصور الذاتى للأرض بالنسبة للشمس كمحور ؟ ($M_{earth} = 6 \times 10^{24}$kg ، $M_{sun} = 2 \times 10^{30}$kg والمسافة بين الأرض والشمس هى 1.5×10^{11}m) .



شكل م ٨ – ١١

١١ – الكتل النقطية الأربع المبينة فى الشكل م ٨ – ١٢ مثبتة بشدة فى قضيب عديم الوزن . (أ) إوجد عزم القصور الذاتى للمجموعة بالنسبة للمحور المبين . (ب) كرر العمل بالنسبة لمحور مشابه يمر خلال النقطة A التى تقع فى منتصف المسافة بين m_1 و m_2 . (جـ) ماقيمة نصف قطر الحركة التدويمية فى كل حالة ؟ اعتبر أن $m_1 = 0.05$ kg ، $b = 0.50 m_2$.



شكل م ٨ – ١٢

١٢* – ركب طوقان فى اطار مهمل الكتلة كما هو مبين فى الشكل ١٨ – ١٣ ، وكانت كتلة الطوق الداخلى M_1 ونصف قطره a ، بينما كانت كتلة الطوق الخارجى M_2 ونصف قطره b . إوجد عزم القصور الذاتى ونصف قطر الحركة التدويمية فى حالة الدوران حول محور عمودى على مستوى الصفحة ومار بالمركز إذا كان $M_2 = \frac{1}{2}M_1$ ، $b = 2a$

١٣ – إوجد عزم القصور الذاتى لقرص مصمت نصف قطره 10 cm وكتلته 200 g.

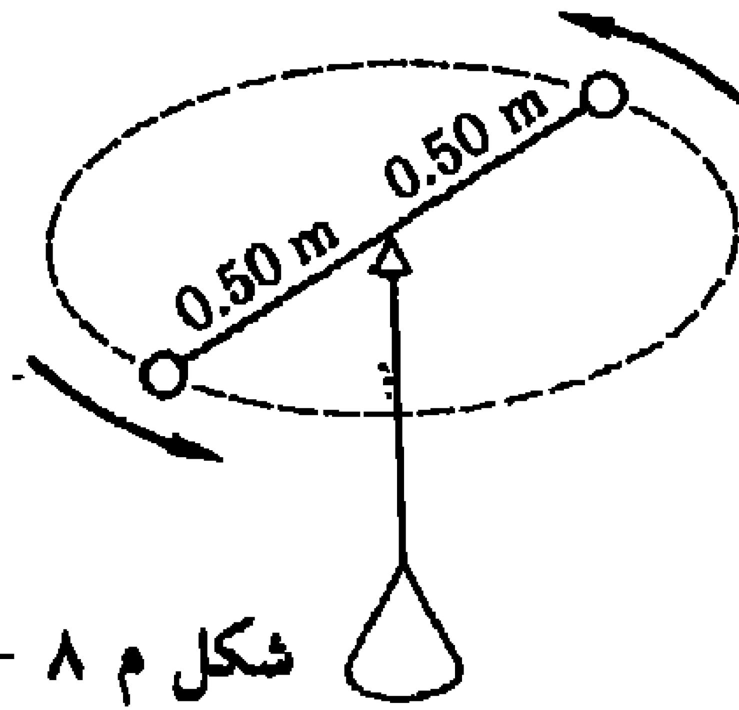
١٤ – عجلة شبيهة بالطوق وزنها 240 lb ونصف قطرها 2.0 ft إوجد عزم القصور الذاتى لها بالتقريب .

١٥ – ماقيمة عزم الدوران اللازم لكى يسبب تسارعا قدره 4.0 rad/s² لعجلة عزم القصور الذاتى لها 0.20 kg. m² ؟

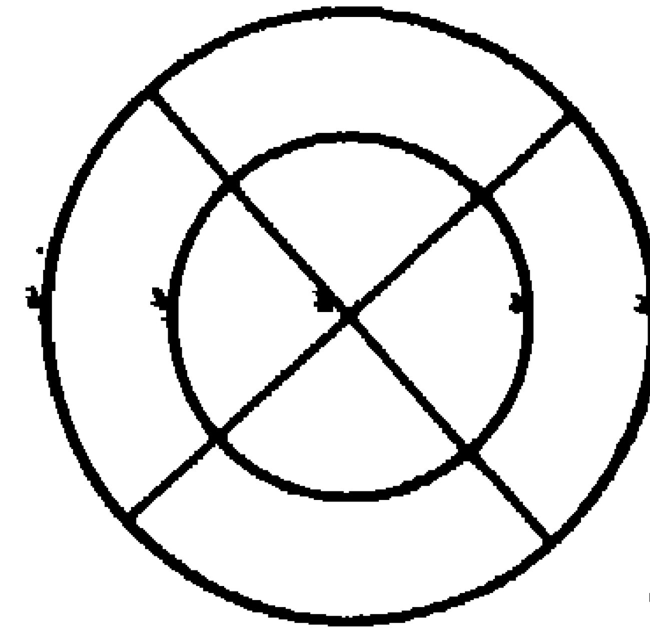
١٦ – تتحرك عجلة عزم القصور الذاتى لها هو $I=0.20 \ kg.m^2$ حركة تدويمية بسرعة قدرها $120/\pi$ rev/min . وعندما فصل التيار عن مصدر القدرة انسابت العجلة بانتظام الى السكون فى زمن قدره 100 s . ماهى قيمة متوسط عزم الدوران الذى أوقفها ؟

١٧ – (أ) ماهى قيمة عزم القصور الذاتى اللازم لتعجيل عجلة وزنها 160 lb ونصف قطر الحركة التدويمية لها $\frac{1}{2}$ ft من السكون الى سرعة قدرها 1/m rev/s فى زمن قدره 20 s؟ ماهى الزاوية التى تدورها العجلة فى هذا الزمن ؟

١٨ – (أ) ماهو الزمن اللازم لكى يتسارع قرص مصمت كتلته 50 kg ونصف قطره 30 cm (يدور حول محوره العادى) من السكون الى 4.0 rad/s إذا علمت أن قوة قدرها 3.0 N تؤثر مماسيا على حافته ؟ (ب) ماهو عدد الدورات التى يدورها القرص فى هذا الزمن ؟



شكل م ٨ – ١٤


شكل م ٨ – ١٣

١٩ – إرجع الى الشكل ٨ – ٢٠ . افترض فى موقف مشابه أن وزن الجسم الساقط 16 lb وأن نصف القطر الخارجى للعجلة 3.0 ft . وقد وجد أن الثقل يسقط مسافة قدرها 4.0 ft فى أول 20 s بعد تحريره . أوجد (أ) عزم القصور الذاتى للعجلة ، (ب) الشد فى الحبل .

٢٠ – بدأ طوق نصف قطره 5.0 m فى التدحرج الى أسفل من السكون على مستوى مائل . (أ) ماهى السرعة الخطية للطوق عند وصوله الى نقطة تقع أسفل البداية بمسافة 30 cm ؟ (ب) ماهى سرعة دورانه بالدورات فى الثانية فى تلك اللحظة ؟

٢١ – كرر المسألة ٢٠ إذا كان الجسم عبارة عن عجلة نصف قطر الحركة الدورانية لها 4.0 cm ونصف قطرها الفعلى 5.0 cm .

٢٢ – يمثل الشكل م٨ – ١٤ كرتين صغيرتين كتلة كل منهما 3.0 kg مثبتتين فى نهايتى قضيب معدنى خفيف طوله 1.00 m . ويرتكز القضيب عند مركزه على محور يدور القضيب حوله بسرعة قدرها 7.0 rev/min ، وكانت المجموعة مجهزة بآلية تستطيع تحريك الكرتين تجاه محور الإرتكاز . (أ) إوجد عزم القصور الذاتى للجهاز الأصلى . (ب) إذا حركت الكرتان فجأة حتى أصبحت كل منهما على بعد 25 cm من محور الإرتكاز ، فما هى السرعة الجديدة للدوران ؟

٢٣* – إرجع مرة أخرى الى الشكل م ٨ – ١٢ . إثبت أن عزم القصور الذاتى فى حالة الدوران حول محور مواز للمحور المبين فى الشكل ويبعد عنه مسافة قدرها d يعطى بالعلاقة $I=Md^2+I_0$ حيث M هى الكتلة الكلية ، I_0 هو عزم القصور الذاتى حول محور يمر بمركز الكتلة . إهمل كتلة القضيب (هذه العلاقة هى واحدة مما يسمى **نظرية المحاور المتوازية**) .

٢٤* – تدور عجلة مصمتة عزم القصور الذاتى لها I_0 حول محور يمر بمركزها . ثبت جسمان متماثلان فى نقطتين متقابلتين على حافة العجلة تقعان على نفس القطر . فاذا كان a نصف قطر العجلة ، M كتلة كل من الجسمين ، إثبت أن عزم القصور الذاتى للعجلة يعطى الآن بالعلاقة $I = I_0 + 2Ma^2$.

٢٥** – تتكون دوامة الخيل فى ملاهى الأطفال أساسا من قرص منتظم كتلته 150 kg ونصف قطره 6.0 m يدور حول محور رأسى . وكان هناك مدرس واقف على القرص عند حافته الخارجية عندما كان يدور بسرعة قدرها 0.20 rev/s . بأى سرعة سوف يدور القرص إذا مشى المدرس مسافة قدرها 4.0 m على طول القطر تجاه المركز ؟ **تلميح** : يجب أن تكون كمية التحرك محفوظة .

٢٦** – لنفرض أن دوامة الخيل التى وصفت فى المسألة ٢٥ تتحرك بسرعة قدرها 0.20 rev/s وأنها لاتحمل أى شخص عليها . فإذا جلس مدرس كتلته 90 kg بسرعة على حافتها ، فما هى سرعتها الجديدة ؟

الفصـــل التـاســـع

الخواص الميكانيكية للمادة

ناقشبنا فى الفصول المختلفة السابقة تأثير القوى وعزوم الدوران على الأجسام الجاسئة . ونريد الآن دراسة بعض خواص الأجسام والمواد التى تتشوه أو تنساب عند تعرضها للقوى ، وهذا ماسوف نفعله فى هذا الفصل . بالإضافة إلى ذلك سوف نعطى مقدمة عن الخواص الاستاتية والدينامية للسوائل .

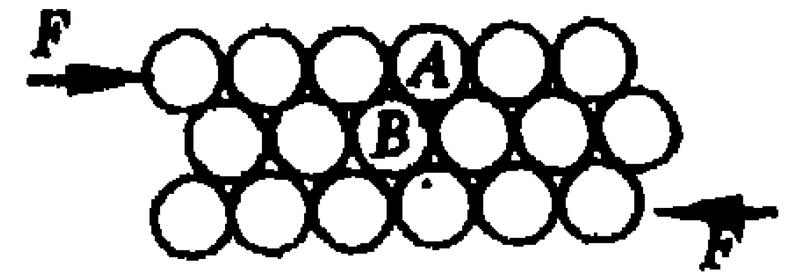
٩ – ١ الحالات الثلاث للمادة

كلنا نعلم جيدا أن هناك ثلاثة تصنيفات عامة للمادة ، وهى الجوامد والسوائل والغازات . وفى الغازات تكون الجزيئات مستقلة تقريبا عن بعضها البعض وتتجول فى الفراغ متصادمة بعضها ببعض ولكنها لاتلتصق نتيجة للتصادم . وتؤدى تصادمات الجزيئات بجدران الوعاء الذى يحتويها إلى ظهور ضغط على هذه الجدران . وقد حسبنا ضغط الغاز فى الفصل السادس ووجدنا أنه يعتمد مباشرة على طاقة حركة الجزيئات . وفى حالة الغازات الخفيفة جدا تكون طاقة حركة الجزيئات كبيرة بدرجة كافية لإهمال الفرق فى طاقة وضع الجزىء عند قاع وقمة أى وعاء معقول بالمقارنة بطاقة حركته . نتيجة لذلك تملأ جزيئات الغاز كل الوعاء الذى توضع فيه .

ومع ذلك فإن الوضع يختلف تماما فى حالة السوائل . وبالرغم من أننا نعلم أن جزيئات السائل توجد فى حالة حركة مستمرة ، فإن طاقة حركتها ليست كافية للتغلب على قوى جذب الجزيئات المجاورة . وهى لذلك لاتستطيع أن تنفصل تماما بعضها عن بعض ، ولهذا السبب توجد جزيئات السائل فى مجموعات مائعة من الجزيئات . ومن آن لآخر قد يكتسب جزىء طاقة حركة كافية لأن ينتزع نفسه من سطح السائل . وهذا هو مايحدث عندما تتبخر الجزيئات من سطح مادة،وسنناقش هذه النقطة بتفصيل أكثر فى هذا الفصل . إذ تنساب السوائل والغازات بسهولة كبيرة . لذلك فإن السوائل والغازات تنتمى إلى تصنيف واحد يسمى الموائع . وبناء على هذا النظام التصنيفى ، تنقسم المواد إلى مجموعتين هما الموائع والجوامد .

اما الجوامد فإنها تشبه السوائل فى نواح كثيرة . والاختلاف بينهما هو إلى حد كبير اختلاف فى الدرجة وليس فى النوع . فبينما لاتزال الجزيئات فى السائل قادرة على الانزلاق على الجزيئات المجاورة ، فإن الجزيئات فى الجامد مثبتة اساسا فى مكانها ، ويفسر ذلك كتقريب جيد بأن القوة بين الجزيئات فى الجامد كبيرة لدرجة أن الجزىء يثبت فى مكانه بشدة بواسطة الجزيئات المجاورة ومن ثم فإن هذه المادة صلدة وجاسئة لآن الجزيئات لاتستطيع الانزلاق على بعضها البعض . وهذا موضح تخطيطيا فى الشكل ٩ – ١ .

شكل (٩ – ١)
يعتمد مدى سهولة انزلاق الطبقات الجزيئية على بعضها البعض تحت تأثير القوى المبينة على قوى الجذب بين الجزيئات كالجزيئين A و B .



فاذا كان جزيئان مثل A و B فى الشكل مرتبطين سويا بشدة فلن يكون من السهل فصلهما . وعندئذ لن تستطيع القوى الموضحة فى الشكل فصل الجزيئات ، ولذلك فإن المادة لن تنساب تحت تأثيرها . ومن ناحية أخرى ، إذا كانت قوى الجذب بين الجزيئين A و B صغيرة نسبيا فإن القوى المسلطة ستسبب انزلاق الطبقات الجزيئية على بعضها البعض . وفى هذه الحالة تكون المادة مائعا .

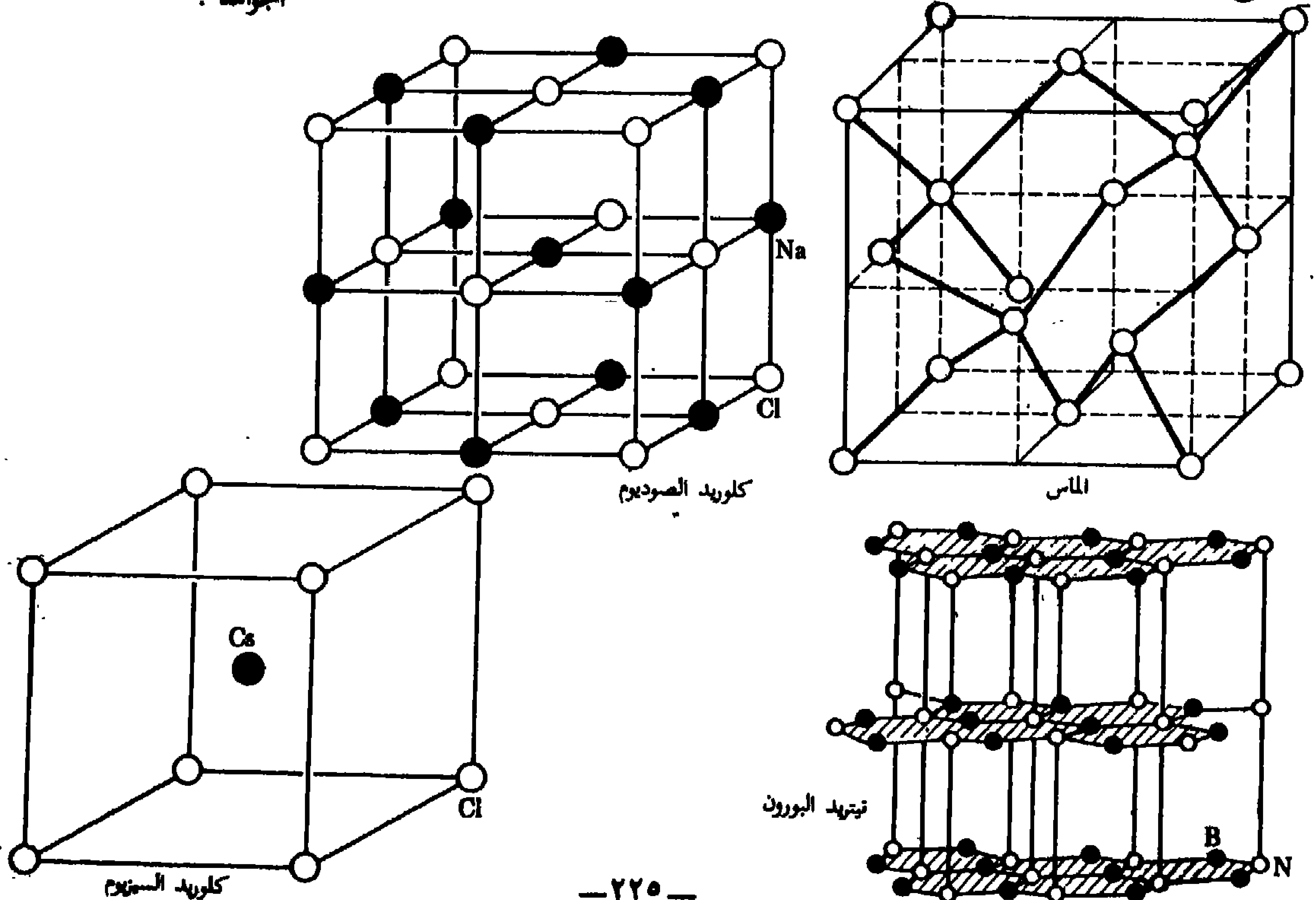
وفى بعض الحالات يصعب أن نقول ما إذا كانت المادة جامدا أم سائلا . فمثلا ، اذا برد دبس السكر (العسل الأسود) فإنه يصبح « غليظا » أو لزجا جدا (من هنا أتت العبارة « أبطأ من العسل الأسود فى يناير ») . وعند درجات الحرارة الأكثر انخفاضا يصير العسل الأسود صلدا للغاية . وبعد ، هل هو جامد ، أم مجرد سائل لزج جدا ؟

ويعتبر زجاج النوافذ مثالا آخر لمثل هذه المواد . فزجاج النوافذ المستخدم حاليا أكثر صلادة من الزجاج الذى كان يستخدم منذ سنوات كثيرة . وليس من غير المعتاد أن تجد زجاج النوافذ القديم جدا أكثر سمكا فى الجزء السفلى منه فى الجزء العلوى ، ومن الواضح أنه قد انساب ببطء شديد مع مرور السنين . وتتصرف اللدائن بنفس هذه الطريقة أيضا . يتضح من هذه الأمثلة إذن أن الخط الفاصل بين الجوامد والسوائل ليس حادا . وسوف نرى فى هذا الفصل أن هناك فى الواقع نوعين من الجوامد ، احدهما مجرد سائل لزج جدا .

٩ — ٢ الجوامد البلورية والزجاجية

تعريف

البلورة هى مجموعة من الذرات أو الجزيئات يحتل فيها كل جزىء موضعا محددا بدقة فى نمط محدد بالنسبة لجيرانه . ويتكرر هذا النمط مرات ومرات فى كل مكان فى البلورة . وكمثال لذلك يمكننا أن نذكر بلورة كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) ، الذى يصور الشكل ٩ — ٢ أجزاءا صغيرة منها .



شكل (٩ — ٢) النسق البلورية لبعض الجوامد .

لاحظ أن ذرات الصوديوم والكلور توجد فى نظام هندسى مثالى فى أركان مكعب . وتتكون البلورة كلها من عدد كبير من هذه المكعبات المتراصة فى نظام تام . فإذا اخذنا ذرة صوديوم فى أى مكان فى البلورة فإننا نجد أن الذرات المجاورة مرتبة بنفس الطريقة تماما كالذرات المجاورة لأى ذرة صوديوم أخرى .

ولكن بنية كثير من البلورات ليست بنفس بساطة النسق التكعيبى لبلورة كلوريد الصوديوم . وبالرغم من ذلك هناك دائما نمط ترتيب محدد للذرات فى أى بلورة . ويتكرر هذا النمط مرابك بطريقة تشبه إلى حد كبير طريقة تكرار النمط فى كثير من أنواع ورق الحائط ، الا أن النمط فى البلورة ثلاثى الأبعاد ولايوجد فى مستوى واحد فقط . ويمثل الشكل ٩ - ٢ أمثلة نموذجية اخرى .

يختلف الموقف كثيرا فى السوائل عالية اللزوجة ، والتى تصل لزوجتها إلى درجة كونها صلدة وقصيفة . فى هذه الحالة لاتكون الجزيئات اكثر ترتيبا منها فى السائل المنصهر . وقد يوجد قدر ضئيل من الترتيب بالقرب من جزىء معين ، ولكن هذا الترتيب لايستمر فى كل مكان فى السائل . وفى هذه السوائل تكون الجزيئات مثبتة فى مكانها ولكن غير مرتبة فى أى نمط محدد . وتسمى **السوائل مفرطة التبريد** زجاجا . **تعريف**

وبالرغم من أن معظم أنواع زجاج النوافذ غير بلورية ، أى سوائل مفرطة التبريد ، فإن هناك كثيرا من المواد الاخرى التى يمكن أن توجد كزجاج . فكثير من اللدائن زجاج غير بلورى ، أى غير متبلور . ومع ذلك فإن بعض اللدائن كالبوليثيلين متبلورة جزئيا وغير متبلورة جزئيا . وعادة مايكون من الصعب أن نحدد ماإذا كانت مادة صلبة معينة متبلورة أو غير متبلورة . وأفضل وسيلة لحسم ذلك هى استخدام الأشعة السينية بالطريقة التى سوف نمسها باختصار فى فصل لاحق من هذا الكتاب .

٩ - ٣ الكثافة والوزن النوعى

هناك طرق كثيرة يمكن أن توصف بها المادة . وتعتمد إحدى أهم هذه الطرق على كمية المادة الموجودة فى وحدة الحجوم وتوصف المادة فى هذه الحالة بدلالة مايسمى **كثافة** المادة . تعرف الكثافة الكتلية لمادة بأنها كتلة وحدة الحجوم من هذه المادة . اذن الكثافة الكتلية = الكتلة / الحجم ، أو بالرموز : **الكثافة الكتلية**

$$d = \frac{m}{V} \qquad (٩ - ١)$$

ومن الواضح أن وحدات الكثافة الكتلية هى الجرام لكل سنتيمتر مكعب ، الكيلوجرام لكل متر مكعب .. الخ. ويستخدم مفهوم الكثافة الكتلية نادرا فى النظام البريطانى للوحدات .

الكثافة الوزنية

فى النظام البريطانى تستخدم الكثافة الوزنية بدلا من الكثافة الكتلية . وتعرف الكثافة الوزنية بأنها وزن وحدة الحجوم من المادة ويمكن صياغة هذا التعريف فى صورة معادلة كالتالى :

$$D = \frac{W}{V} \qquad (٩ - ٢)$$

وعادة يعبر عن الكثافة الوزنية بالوحدات باوند لكل قدم مكعب . وبالطبع هناك وحدات أخرى للكثافة الوزنية ، ولكنها لاتستخدم عادة . وحيث أن $W = mg$ فإن :

$$D = dg$$

وفى كثير من الاحيان يستخدم نفس الرمز للدلالة على الكثافة الوزنية والحجمية ، وتتحدد الكمية المعنية من سياق الكلام . وكثيرا مايستخدم الحرف اليونانى ρ (رو) للتعبير عن الكثافة الكتلية بدلا من d, أو D .

يتمدد كثير من المواد عند تسخينها ،ويحدث هذا التمدد نتيجة لأن الجزيئات تهتز لمسافات أكبر عند درجات الحرارة الأعلى ، لذلك فإن المسافة بين الجزيئات تزداد . وحيث أن وحدة الحجوم سوف تتغير إذا تباعدت الجزيئات عن بعضها البعض ، فإن كثافة المادة سوف تتغير مع درجة الحرارة . وبالرغم من أن كثافة معظم المواد تقل بزيادة درجة الحرارة فإن هناك بعض الاستثناءات الشائعة التى تزداد فيها الكثافة بالفعل عند ارتفاع معين فى مدى معين من درجات الحرارة . ومن أمثلة هذه المواد الماء فى المدى من 0 إلى 4.0°C . وعلى سبيل المثال أعطيت كثافة بعض المواد المألوفة فى الجدول ٩ - ١ . وعند استخدام هذه البيانات من المناسب أن تعلم أن :

$$1\ kg/m^3 = 10^{-3}\ g/cm^3$$

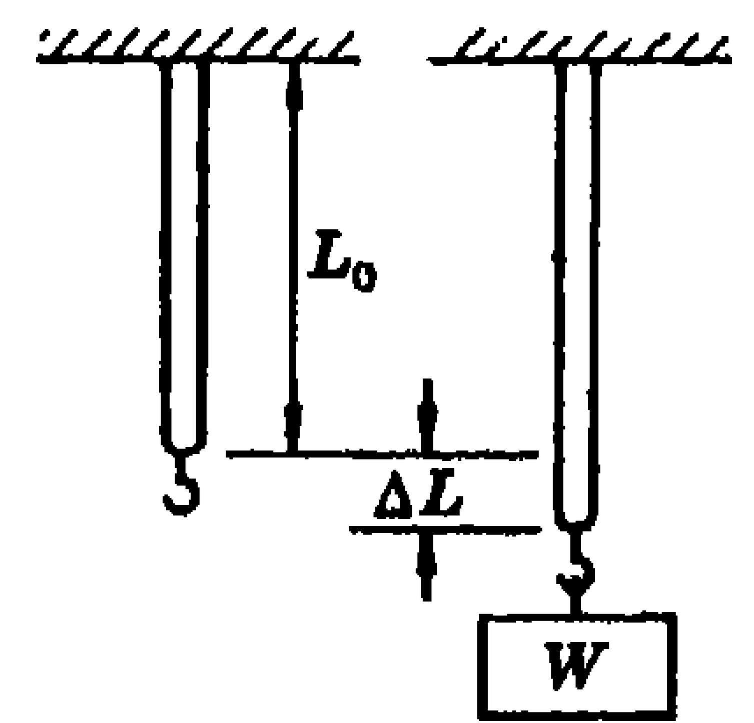
جدول ٩ - ١
كثافة بعض المواد

المادة	درجة الحرارة °C	d, kg/m³	D, lb/ft³
الهواء (عند الضغط المعتاد)	0.0	1.29	0.0805
البنزين	20.0	879	56.1
الماء	20.0	998	62.3
الماء	3.98	1,000	62.4
العظم	20.0	~1,800	106-125
الالمنيوم	20.0	2,700	168
الحديد	20.0	7,860	491
النحاس	20.0	8,920	557
الرصاص	20.0	11,340	708
الزئبق	0.0	13,600	849

تعريف

يعرف **الوزن النوعى** ، أو **الكثافة النسبية** ، لمادة بأنها النسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء . ولابد من تحديد درجة الحرارة التى تعين فيها هذه النسبة . ومن المعتاد أن تؤخذ هذه النسبة عند 3.98 °C وهى درجة الحرارة التى تكون فيها كثافة

الماء $1000\ kg/m^3$. وفى هذه الحالة يتساوى الوزن النوعى عدديا مع الكثافة الكتلية مقاسة بالوحدة g/cm^3 .



شكل (٩ - ٣)
يتناسب مقدار استطالة القضيب تحت تأثير الحمل W مع الحمل ومع L_0 أيضا ، بشرط أن يتحقق قانون هوك .

٩ - ٤ قانون هوك

توصف المادة بطريقة اخرى بدلالة قابليتها للتشوه . وهناك نوعان أساسيان من التشوه . النوع الأول تنساب فيه المادة تحت تأثير القوة ، وهذا السلوك مميز للموائع . أما النوع الثانى ، وهو مؤقت فقط ، فإنه مرن فى طبيعته ، ومن أمثلته (استطالة) الزنبرك . ويمتاز هذا النوع من التشوه بأنه إذا أزيلت القوة المشوهة فإن التشوه يعود صفرا مرة اخرى . لنفحص الآن هذا النوع الاخير من التشوه .

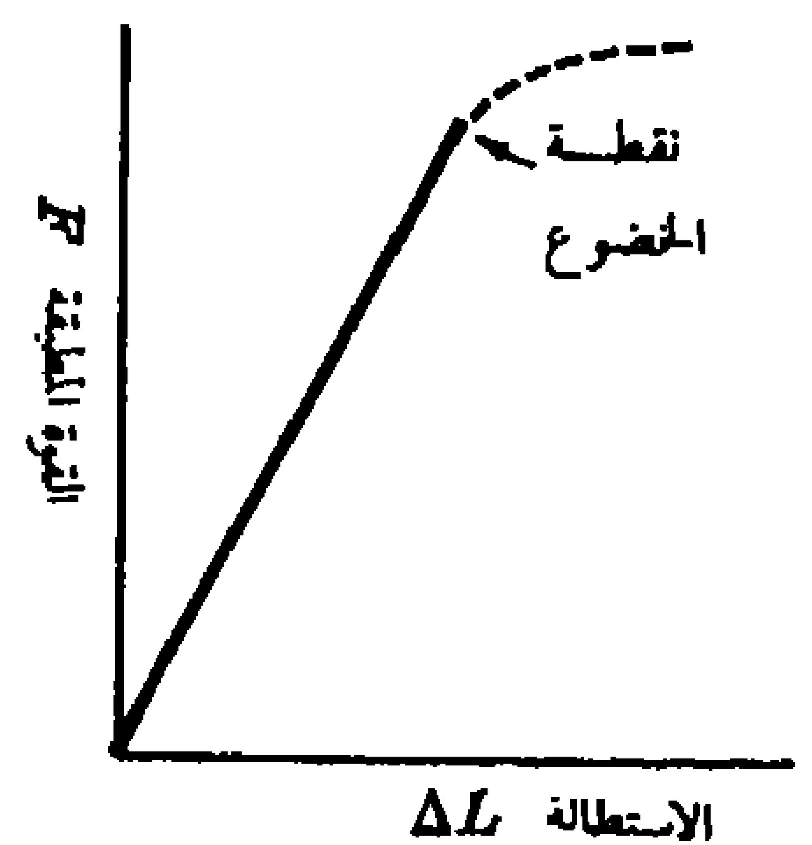
إذا تعرض قضيب جاسىء كالمبين فى الشكل ٩ - ٣ لقوة مطيلة بتعليق ثقل فيه فإن القضيب سوف يستطيل مسافة قدرها ΔL . وفى معظم المواد الصلبة يكون الرسم البيانى الذى يمثل العلاقة بين الحمل المستخدم F والاستطالة ΔL شبيها بدرجة كبيرة بالشكل ٩ - ٤ . ويوضح هذا الشكل أنه إذا ضعف الحمل المستخدم فإن مقدار الاستطالة سوف يتضاعف . ويعبر عن ذلك رياضيا بالمعادلة التالية :

$$F = (\text{const})(\Delta L) \qquad (٩ - ٣)$$

حيث F هى القوة المؤثرة . علاوة على ذلك فإن القضيب يعود إلى طوله الأصلى بعد إزالة الحمل إذا لم يكن هذا الحمل كبيرا جدا . ويقال عندئذ أن القضيب **مرن** فى هذا المدى من الأحمال . وتمثل المعادلة (٩ - ٣) الصيغة الرياضية **لقانون هوك** الذى ينص على مايلى :

قانون هوك يتناسب التشوه مع القوة المشوهة

ونؤكد ثانية أن التشوه يعود صفرا مرة اخرى عند إزالة القوة المشوهة وذلك فى مدى المرونة .



شكل (٩ - ٤)
المنحنى النموذجى للإجهاد والانفعال ، وينطبق قانون هوك فى المنطقة الخطية .

وبالرغم من ذلك فإن الرسم البيانى الموضح فى الشكل ٩ - ٤ سوف يبدأ فى الانحراف عن الخط المستقيم - ربما انحرف كما هو مبين بالمنحنى المنقط - إذا كان الحمل المطبق على القضيب كبيرا جدا . علاوة على ذلك فإن القضيب لايعود عادة إلى طوله الاصلى تماما بعد ازالة الحمل . ويقال فى هذه الحالة أن القضيب قد استطال بعد حد مرونته . وقد ينكسر القضيب إذا زيد الحمل كثيرا بعد حد المرونة .

وتفسر استطالة القضيب بدلالة جزيئاته او ذراته بأن القوة المطيلة ، أو قوة الشد ، تسبب تباعدها عن بعضها البعض . ويتضح من الشكل ٩ - ٥ أن قوة الشد قد فصلت الذرات قليلا فى اتجاه القوة .وتؤدى الانفصالات الصغيرة جدا عند

جمعها فى اتجاه طول القضيب إلى الاستطالة المشاهدة . وطالما كانت هذه الانفصالات بين الذرات صغيرة فإن مسافة الانفصال تتناسب مع القوة المطيلة المستخدمة ويتحقق قانون هوك ، أى المعادلة (٩ - ٣) . ومع ذلك فإن المدى الذى يتحقق فيه قانون هوك يختلف بدرجة كبيرة من مادة لأخرى ، وعادة مايكون من الصعب التنبؤ به بدون تخطيط رسم بيانى كالمبين فى الشكل ٩ - ٤ بالفعل .

شكل (٩ - ٥)
تحاول القوة المطبقة على القضيب أن تفصل الجزيئات بالطريقة المبينة .





٩ - ٥ الإجهاد والانفعال

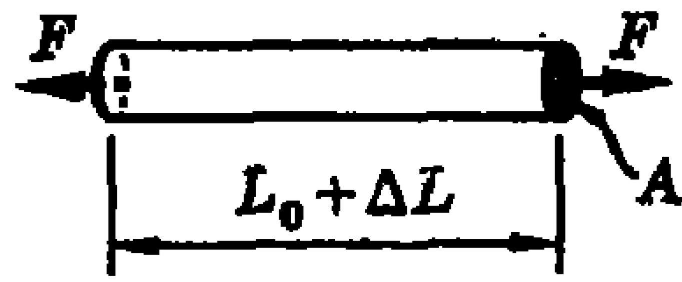
يمكن صياغة قانون هوك فى صورة اكثر نفعا . وإذا وضعت هذه الصيغة بدلالة الإجهاد والانفعال فإنها سوف تنطبق على مواقف كثيرة مختلفة .

الإجهاد والانفعال مصطلحان لهما معنى محدد فى علم الفيزياء وبالرغم من أن هاتين الكلمتين تستخدمان كثيرا فى اللغة الدارجة الا أن استخدام العلماء لهما مبنى على التعريف المضبوط لهاتين الكلمتين كما سنرى حالا .

تعريف يعرف **الاجهاد** بأنه القوة المطبقة على وحدة المساحات من السطح الذى تطبق عليه القوة . لنعتبر القضيب المبين فى الشكل ٩ - ٦ على سبيل المثال . قوة الشد (أو القوة المطيلة) F مطبقة فى هذه الحالة على سطح طرف القضيب ، وواضح من الشكل أن مساحة مقطع القضيب هى A . يعرف الإجهاد على القضيب إذن كالتالى :

الاجهاد (٩ - ٤)
$$\text{الاجهاد} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}} = \frac{F}{A}$$

لاحظ على وجه الخصوص أن المساحة المعنية ليست المساحة الخارجية للقضيب ولكن مساحة مقطعه فقط .



شكل (٩ - ٦)
الاجهاد هو F/A والانفعال هو $\Delta L/L_0$.

وحدات الاجهاد هى الباوند لكل قدم مربع ، الباوند لكل بوصة مربعة ، النيوتن لكل سنتيمتر مربع ... الخ . وقد تذكر أن الضغط يقاس أيضا بنفس هذه الوحدات ، فقد رأينا أن كلا من الإجهاد والضغط يعرف بأنه القوة لوحدة المساحات . ومن ثم فإن الضغط على جدار وعاء هو مجرد القوةالضاغطة لوحدة المساحات من الجدار وليس القوة المطيلة المبينة فى الشكل ٩ - ٦ . وسوف نرى فى اجزاء لاحقة من هذا الفصل أنواعا اخرى من الإجهادات لأجسام ذات أشكال هندسية مختلفة .

تعريف يعرف **انفعال** جسم ما بأنه تشوه هذا الجسم مقسوما على بعده الاصلى قبل التشوه . فمثلا يعتبر الانفعال فى القضيب المبين فى الشكل ٩ - ٥ مقياسا لمقدار استطالة القضيب . ولكن استطالة القضيب ΔL تحت تأثير القوة المطبقة ليست مقياسا جيدا للانفعال فى القضيب وذلك لأن قضيبا طوله ضعف القضيب

المبين فى الشكل سيستطيل ضعف استطالة القضيب الأول تحت تأثير نفس القوة ، وهذا لأن عدد انفعالات الذرات فيه ضعف مافى الأول . ومن ثم فإن ΔL تتناسب مع طول القضيب عند ثبوت الإجهاد . ولكى نتخلص من هذا الاعتماد على الطول يعرف الانفعال فى الحقيقة بأنه استطالة قضيب طوله الاصلى وحدة واحدة .

أى أن :

الانفعال

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\text{الاستطالة}}{\text{الطول الأصلى}} = \text{الانفعال} \qquad (٩ - ٥)$$

والانفعال ليس له وحدات ، لأنه ببساطة النسبة بين طوليه .

سوف نرى فى أجزاء لاحقة أن هناك أنواعا عديدة من الانفعال تعتمد على الشكل الهندسى للنظام . ونحن نتكلم الآن عن انفعال الشد وإذا ضغط القضيب فإن الانفعال سيكون النسبة بين النقص فى الطول والطول الأصلى . يمكننا الآن اعادة صياغة قانون هوك . وحيث أن القوة F تتناسب مع التشوه ، يمكننا استبدال F بالاجهاد لأن كلا منهما يتناسب مع الآخر . بالمثل يمكننا استبدال التشوه بالانفعال . اذن فإن قانون هوك سيصبح كالتالى :

قانون هوك

$$\text{الانفعال} \propto \text{الاجهاد}$$

ويمكن تطبيق قانون هوك فى هذه الصورة على مواقف كثيرة أخرى خلاف استطالة القضيب . فمثلا ، ثبت أن قانون نيوتن ينطبق على استطالة وانحناء والتواء عديد من الزنبركات والأجسام الاخرى .

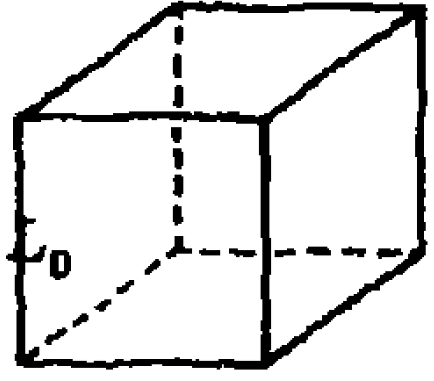
٩ - ٦ مفهوم المعامل

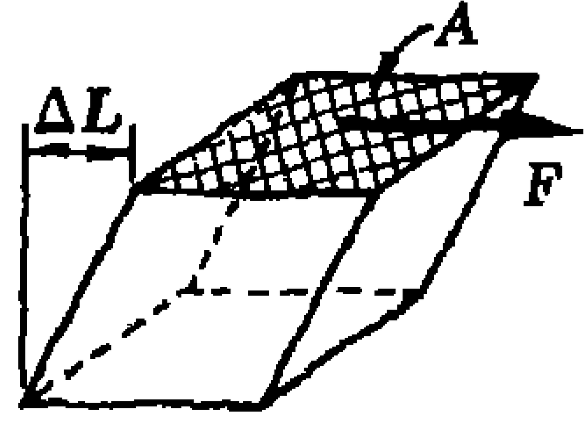
إذا كان الإجهاد اللازم لإحداث انفعال صغير فى جسم ما كبيرا ، فإن الجسم يكون صلدا وجاسئا ، وتقاس خاصية الصلادة ، أو الجسوءة **بمعامل المادة** . وهناك أنواع مختلفة من المعاملات لمختلف أنواع تشوه المادة كالاستطالة والانحناء وغير ذلك ، وسنناقش فى هذا الجزء بعضا من هذه المعاملات . وتعرف جميع هذه المعاملات بالمعادلة التالية لأشكال هندسية خاصة :

المعامل

$$\frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}} = \text{المعامل}$$

وحيث أن الانفعال لاوحدات له ، فإن وحدات المعامل هى نفس وحدات الإجهاد .





شكل (٩ – ٧)
ΔL مبالغ فيها هنا لكى يمكن رؤيتها بسهولة ويعطى معامل القص بالكمية $\frac{F/A}{\Delta L/L_0}$

جدول ٩ ٢

معامل يونج Y والانضغاطية الحجمية k

معامل يونج*		الانضغاطية		
10^{10} N/m²	10^{6} lb/in²	10^{-11} m²/N	10^{-7} in²/lb	مادة
35	51	0.5	0.3	تنجستن
19-20	27-29	0.6	0.4	صلب
18-20	26-29	0.7	0.5	حديد (مطاوع)
~14	~20	—	—	عظم المحد
10-13	14-19	0.8	0.5	نحاس
9	13	1.6	1.1	نحاس أصفر (مدلفن على البارد)
8-10	12-14	1.0	0.7	حديد (زهر)
5.6-7.7	8-11	1.5	1.0	الومنيوم
~0.14	~0.20	20	15	بولستيرين
—	---	50	34	ماء
—		100	69	سرين

* العلامة 10^{10} N/m² تعنى أن وحدات الأرقام المدرجة فى الجدول أكبر 10^{10} مرة من N/m² . إذن Y للتنجستن هو 35×10^{10} N/m² .

معامل يونج : يستخدم هذا المعامل لوصف المواقف التى تشبه استطالة القضيب المبين فى الشكل (٩ – ٦) . وتتضح أهمية هذا المعامل عندما يراد حساب استطالة سلك أو قضيب تحت تأثير قوة شد معينة . ومن التعريف نجد أن :

$$\text{معامل يونج} = Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \qquad \text{(٩ – ٦) معامل يونج}$$

ويوضح الجدول ٩ – ٢ قيم Y لبعض المواد .

معامل القص . افترض أننا نريد تشويه مكعب من مادة معينة بالطريقة المبينة فى الشكل ٩ – ٧ . لذلك يجب أن تطبق قوة F موازية للوجه العلوى ومساحته A . وفى هذه الحالة يظل الإجهاد F/A والانفعال $\Delta L/L_0$ ، ولكن لاحظ تعريف هذه الرموز فى الشكل . إذن :

$$\text{معامل القص} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \qquad \text{(٩ – ٧) معامل القص}$$

وبالرغم من أن هذه المعادلة تماثل معادلة معامل يونج ٩ – ٦ ، يجب أن نلاحظ أن الرموز فيهما معرفة بطريقتين مختلفتين .

وقد وجد أن معامل القص لكثير من المواد يساوى ثلث معامل يونج تقريبا . ويستثنى من هذه القاعدة أساسا المواد التى يتغير حجمها عند التشوه أو المواد التى تختلف خواصها باختلاف الاتجاهات .

فى كثير من الأحيان يكون من المفضل استخدام مقلوب معامل القص ومعامل يونج (أى معامل الشد) وهى تقيس مدى سهولة تشوه المادة وليس مدى صعوبة تشوهها ، ولهذا فإنهما يسميان بالاسمين الوصفيين **مطاوعة القص ومطاوعة الشد** .

معامل الحجم . لنفرض أن قالبا حجمه V_0، قد تعرض لزيادة فى الضغط مقدارها ΔP على جميع جوانبه كما هو موضح فى الشكل ٩ — ٨ . عندئذ سوف يتقلص حجم المكعب بمقدار ΔV . ويعرف الانفعال فى هذه الحالة بالكمية $\Delta V/V_0$ بينما يكون الإجهاد هو الضغط المطبق . وكما هى العادة ، يعرف معامل الحجم بالنسبة بين الإجهاد والانفعال .

إذن :

معامل الحجم

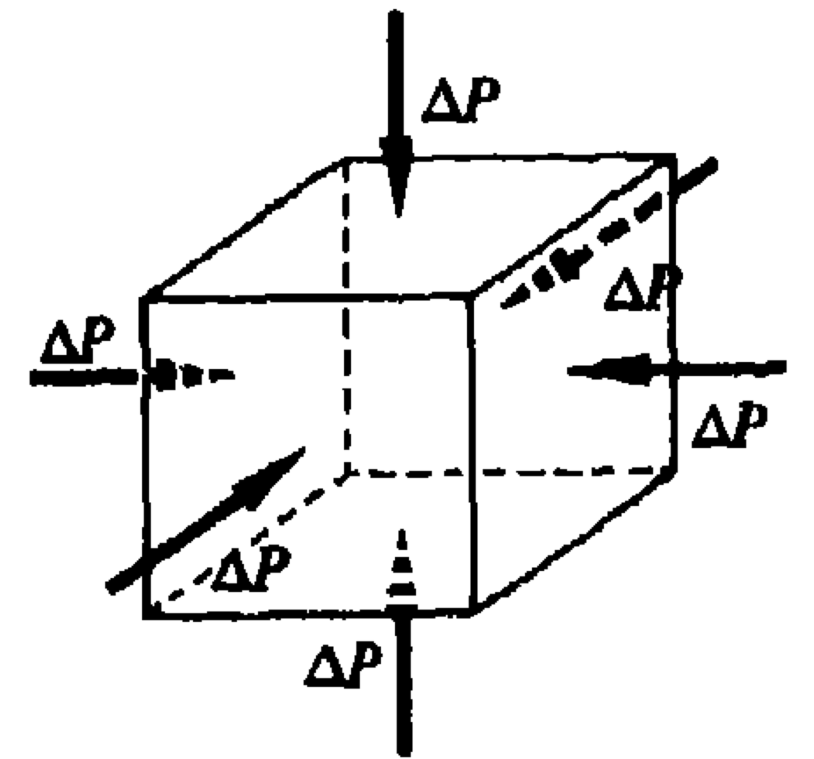
$$E = \text{معامل الحجم} = \frac{\Delta P}{\Delta V/V_0} \qquad (٩ - ٨)$$

وسنناقش مقلوب هذه الكمية ، أى الانضغاطية ، فيما بعد

الانضغاطية الحجمية k **. يعتبر معامل الحجم مقياسا لدرجة الصعوبة التى تنضغط بها المادة ، فى حين أن الانضغاطية** k **تعتبر مقياسا لدرجة السهولة التى تنضغط بها المادة . والانضغاطية هى مقلوب معامل الحجم** . وعادة تكتب معادلة تعريف الانضغاطية كالتالى :

تعريف

$$\frac{\Delta V}{V_0} = k\Delta P \qquad (٩ - ٩)$$



شكل (٩ — ٨)
سوف ينكمش المكعب ذو الحجم الاصلى V_0 بمقدار ΔV عند زيادة الضغط الخارجى بمقدار ΔP

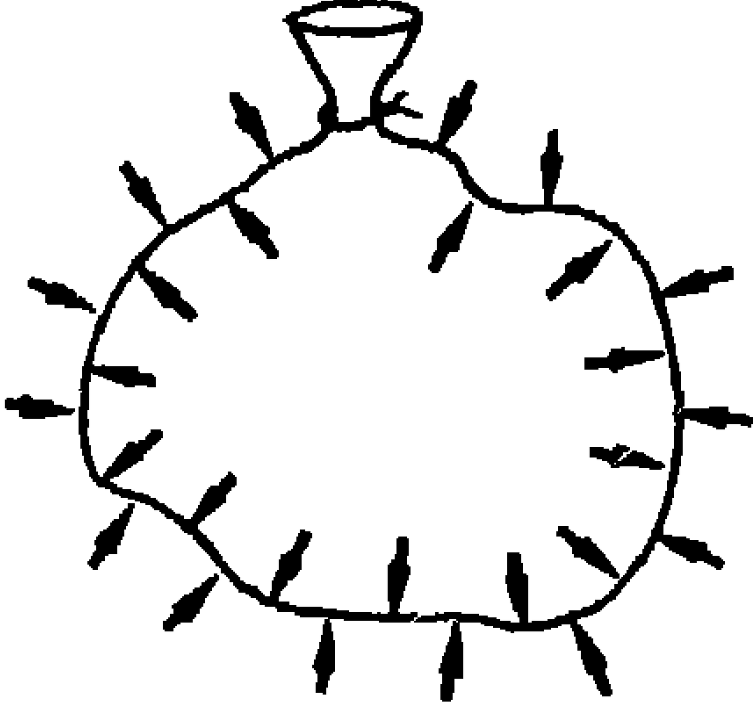
ووحداتها هى وحدات مقلوب الضغط ، وقد أعطينا فى الجدول ٩ — ٢ بعض القيم النموذجية لها . لاحظ أن انضغاطية السوائل أكبر كثيرا من انضغاطية الجوامد البلورية . وهذا يعكس بوضوح حقيقة ان المسافات بين جزيئات السائل كبيرة نسبيا ، ويؤدى الانضغاط ببساطة إلى تقارب الجزيئات من بعضها البعض .

٩ — ٧ الضغط فى مائع

أنت وأنا نعيش فى قاع بحر ضخم من الهواء . وتوجد أجسامنا بشكل دائم تحت الضغط الناتج من وزن ارتفاع هائل من الهواء الموجود فوقنا . وكما سنرى فى الفصل التالى ، تتعرض كل بوصة مربعة من أجسامنا لقوة تساوى حوالى 14.7 lb (1×10^5 N/m²) ولكننا بالرغم من ذلك لانشعر فى أكثر الحالات بوجود هذه القوة . لماذا ؟

يشبه الجسم فى كثير من الوجوه كيسا من الورق مملوء بالهواء فقط ، إذ توجد فى داخلنا فجوات كالرئتين مثلا ، وتكافىء هذه الفجوات بشكل تقريبى داخل الكيس الورق . وعندما نغلق فوهة الكيس فإنه لاينطوى تحت تأثير ضغط الهواء عليه ، لأن

الهواء الموجود فى داخل الكيس يؤثر عليه بقوة متجهة إلى الخارج تساوى القوة التى يؤثر بها الهواء الخارجى عليه إلى الداخل والتى تحاول أن تسبب انطواءه (أنظر الشكل ٩ — ٤٦ . وحيث أن هاتين القوتين متزنتان فإن الكيس يبدو كما لو لم يوجد أى ضغط للهواء عليه . وهذا صحيح أيضا بالنسبة لأجسامنا .

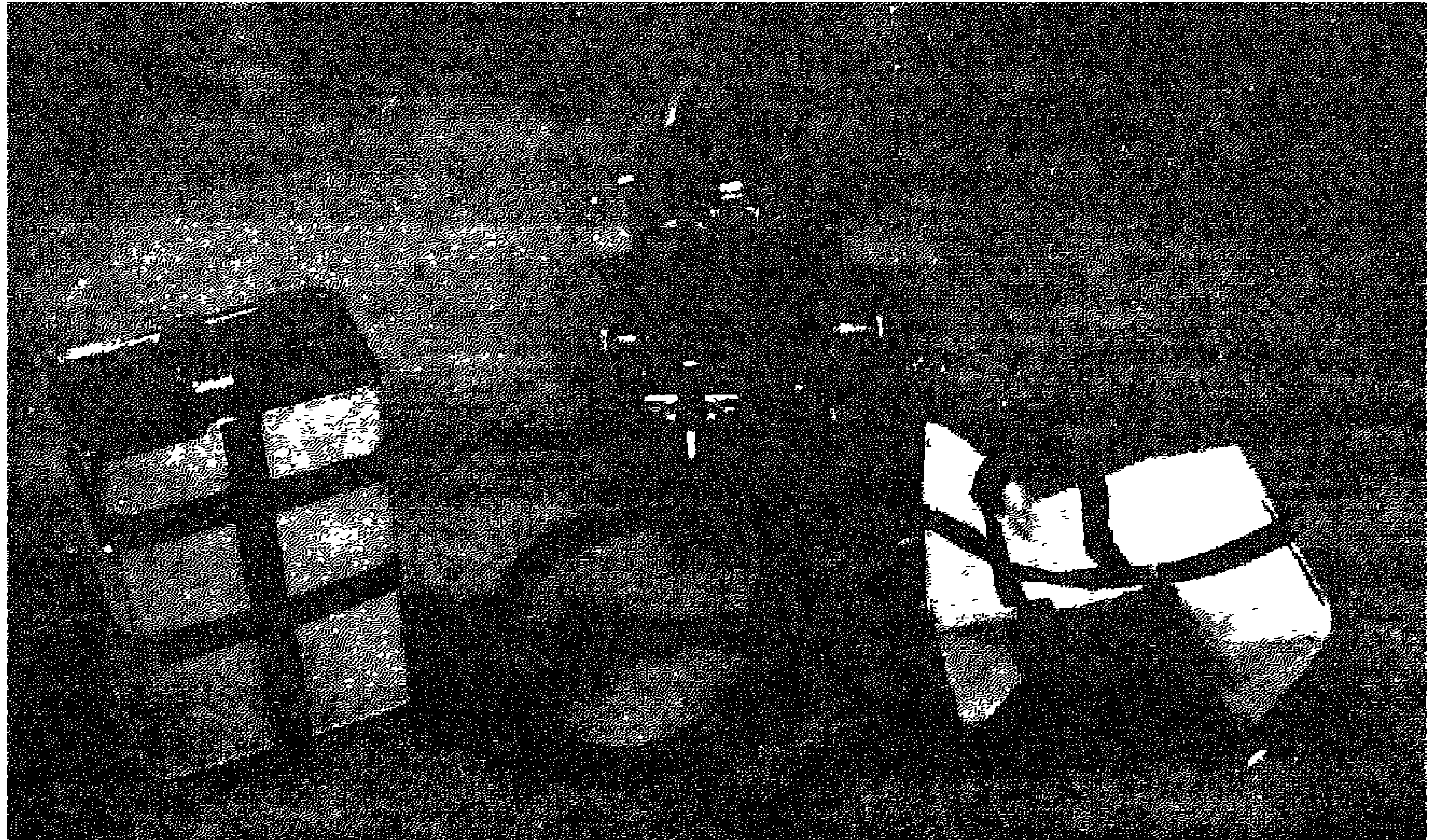


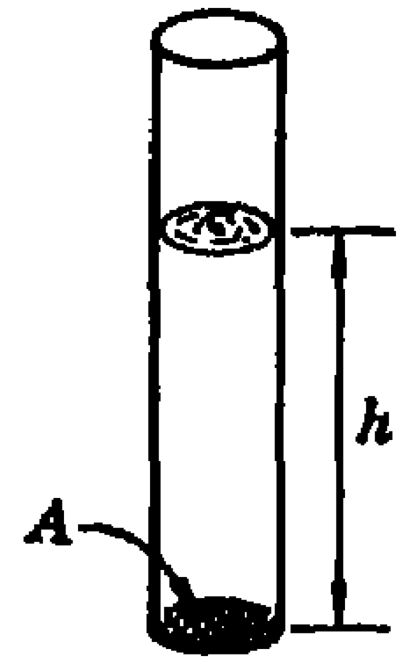
شكل (٩ — ٩)
ينطوى الكيس لأن ضغط الهواء عليه من الداخل يتزن مع ضغط الهواء عليه من الخارج .

ومع ذلك فإذا تخلصنا من الهواء الموجود داخل الكيس فإن القوى المتجهة إلى الخارج والمؤثرة على الكيس من الداخل ستختفى ، وعندئذ سوف ينطوى الكيس . ويظهر الضغط الهائل للهواء بشكل درامى عندما يفرغ الهواء بالضخ من علبة معدنية . ومالم تكن العلبة صلبة إلى أبعد حد فإنها سوف تنهار تحت تأثير الضغط غير المتزن للهواء الذى نعيش فيه . وهذا موضح فى الشكل ٩ — ١٠ .

وتمثل الظاهرة العكسية للظاهرة التى ناقشناها توا أهمية حياة أو موت فى عصر الطيران فى الفضاء الذى نعيش فيه الآن وحتى فى حالة الطائرات النفاثة التى تطير على ارتفاعات كبيرة . لنفرض أن الكيس المبين فى الشكل ٩ — ٩ موجود فى سفينة فضائية ، وأن السفينة قد تعرضت لحادثة أدت إلى انهيار الضغط فيها . عندئذ سوف يهبط الضغط فى السفينة فجأة إلى الصفر ، وبذلك تختفى القوى المؤثرة على الكيس من الخارج . نتيجة لذلك لن يصبح ضغط الهواء فى داخل الكيس متزنا بعد ، ومن ثم فإن الكيس سوف ينفجر . ومن الواضح أن الإنسان سيتعرض لخطر رهيب فى مثل هذا الموقف .

شكل (٩ — ١٠)
يفرغ الهواء من العلبة المعدنية بالضخ ، وتنهار العلبة تحت تأثير القوى غير المتزنة الناتجة من الضغط الجوى خارجها .





شكل (٩ – ١١)
القوة المؤثرة على قاع الأسطوانة نتيجة للمائع تساوى وزن المائع .

لندرس الآن الضغوط الناتجة من أعمدة الموائع التى يمثل الشكل ٩ – ١١ حالة بسيطة منها فى صميم الموضوع . وواضح من الشكل أن طول عمود السائل الموجود فى الانبوبة هو h ومساحة مقطعه A . يراد الآن حساب الضغط على المساحة السفلية A نتيجة للمائع الموجود فوقها .

سبق أن عرفنا الضغط فى الفصل السادس بأنه القوة المؤثرة على وحدات المساحات ، أو ، بالرموز :

$$P = \frac{F}{A}$$

حيث F يجب أن تكون عمودية على A . إذن ، القوة الناتجة من المائع على قاع الوعاء تساوى مجرد وزن السائل الموجود فوقها . ولكن وزن وحدة الحجوم من المائع هو الكثافة الوزنية للمائع D كما ذكرنا سابقا . ومن ثم فإن القوة المؤثرة على قاع الوعاء نتيجة للمائع هى حجم المائع الموجود فوق القاع hA مضروبا فى وزن وحدة الحجوم D ويعبر عن هذه القوة فى صورة معادلة كمايلى :

$$F = (hA)(D)$$

بقسمة طرفى المعادلة على مساحة المقطع A نجد أن ضغط مائع ارتفاعه h يعطى بالعلاقة :

$$\Delta P = \frac{F}{A} = hD$$

ونحن نستخدم ΔP للدلالة على هذه الكمية وليس لأن الكمية التى حسبناها هى فقط جزء من الضغط . ذلك لأن المائع الإضافى الموجود فوق المائع المعنى ، وكذلك الضغط الجوى يشاركان فى تكوين الضغط الكلى P ، وهو أكبر من الكمية التى حسبناها ΔP .

يلاحظ أننا استخدمنا الكثافة الوزنية D فى التعبير الخاص بالكمية ΔP . أما إذا أردنا التعبير عن هذه العلاقة بدلالة الكثافة الكتلية d فسيكون من الضرورى أن نوجد وزن كتلة معينة من المائع . وكتلة عمود المائع هى حجمه hA مضروبا فى كتلة وحدة الحجوم d . ولكن وزن كتلة معينة يساوى هذه الكتلة مضروبة فى تسارع الجاذبية g وعليه فإن ضغط مائع ارتفاعه h هو :

$$\Delta P = hD$$

ضغط المائع أو : $$\Delta P = hdg \qquad (٩ - ١٠)$$

مثال توضيحى ٩ — ١ : اوجد ضغط عمود من الماء ارتفاعه 34 ft .

طريقة الحل : من الجدول ٩ — ١ نجد أن الكثافة الوزنية للماء هى $62.4\ lb/ft^3$.
إذن ، من المعادلة (٩ — ١٠) :

$$\Delta P = (34\ ft)(62.4\ lb/ft^3) = 2120\ lb/ft^2$$

وإذا فضلنا قياس الضغط بالباوند لكل بوصة مربعة ، يمكننا استخدام حقيقة أن $1\ ft^2 = 144\ in^2$ ، إذن :

$$\Delta P = \left(2120\,\frac{lb}{ft^2}\right)\left(\frac{1\ ft^2}{144\ in^2}\right) = 14.7\ lb/in^2$$

لاحظ أن هذا الضغط يساوى تماما الضغط عند سطح الأرض نتيجة لوزن الهواء الموجود فوق الأرض ، والذى أعطى سابقا فى هذا الجزء . إذن ، ضغط الهواء على سطح الأرض يكافىء ضغط عمود من الماء ارتفاعه 34 ft (10.4 m) .

مثال توضيحى ٩ — ٢ : اوجد ضغط عمود من الزئبق ارتفاعه 76 cm .

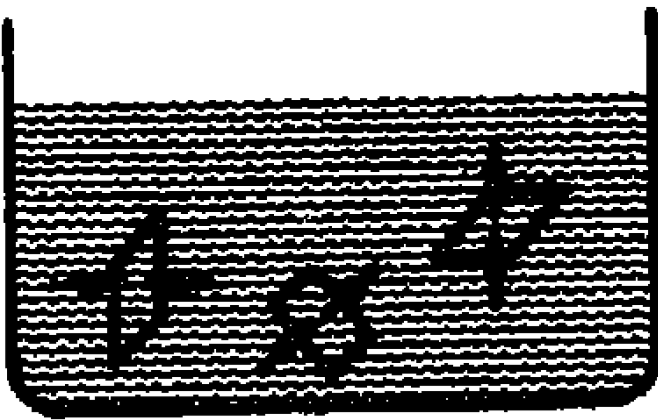
طريقة الحل : من الجدول ٩ — ١ نجد أن الكثافة الكتلية للزئبق هى $13.600\ kg/m^3$. وحيث أن $\Delta P = hdg$ ، إذن :

$$\Delta P = (0.76\ m)(13{,}600\ kg/m^3)(9.80\ N/kg) = 1.01 \times 10^5\ N/m^2$$

(اثبت باستخدام المعادلة $F = ma$ أن من الممكن التعبير عن وحدات g بالنيوتن لكل كيلوجرام كما يمكن التعبير عنها بالوحدات المعتادة وهى المتر فى الثانية المربعة) . وبالرغم من أننا لن نتابع الموضوع هنا اكثر من ذلك . فإن هذا الضغط يساوى $14.7\ lb/in^2$. ومن ثم فإن الضغط الذى يسببه عمود من الزئبق ارتفاعه *76 cm* يكافىء الضغط الجوى .

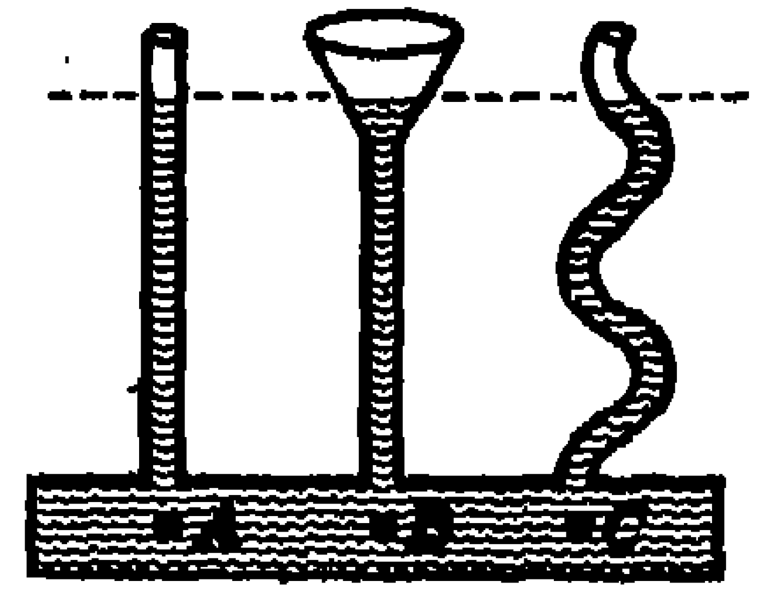
٩ — ٨ خواص الضغط فى الموائع

يؤثر الضغط فى الموائع فى جميع الاتجاهات . ويمكن التحقق من ذلك بسهولة عند دراسة التجربة العملية الموضحة فى الشكل ٩ — ١٢ . إذا أخذت قطعة من الورق الرقيق ووضعتها بالقرب من قاع صهريج به ماء كما هو مبين فى الشكل فإن الورق الرقيق لن ينحنى أو يتحرك بدرجة محسوسة نتيجة لضغط الماء الساكن . يجب إذن أن نستنتج أن القوة الناتجة من ضغط الماء على أحد وجهى قطعة الورق تتزن مع قوة أخرى مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه تؤثر على الوجه الآخر . وحيث أن هذا صحيح مهما كان اتجاه قطعة الورق ، فإن ضغط السائل فى نقطة معينة يجب ان يكون متساويا فى اتجاه معين وفى الاتجاه المعاكس .



شكل (٩ — ١٢)
حيث أن فرخ الورق يمكن أن يوجد فى حالة توازن فى الأوضاع المبينة ، نستنتج أن الضغط فى أى نقطة فى السائل متساو فى جميع الاتجاهات .

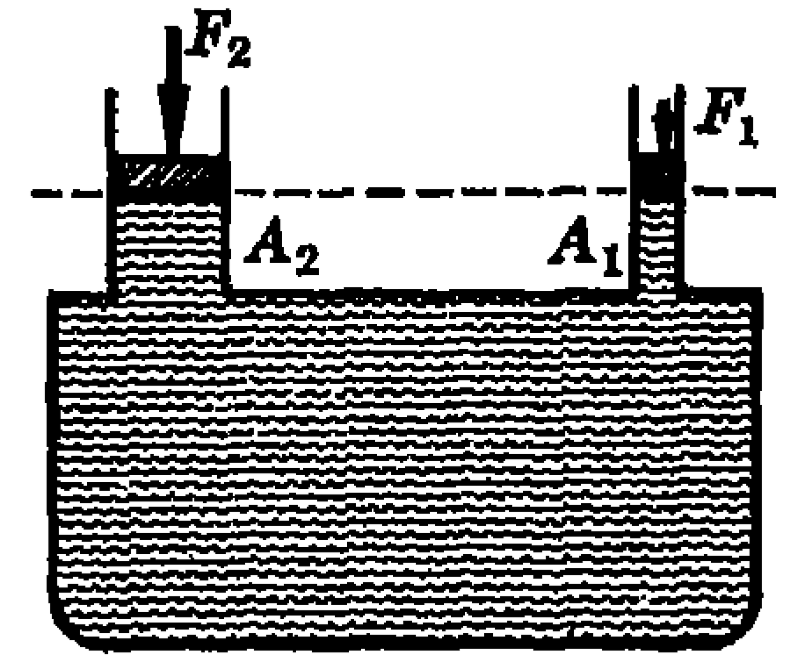
وحيث أن ضغط السائل فى أى نقطة تحت سطح السائل فى الشكل ٩ — ١٢ هو hD حسب المعادلة (٩ — ١٠) ، فإن الضغط يجب أن يكون واحدا فى جميع النقط الواقعة على عمق معين بالنسبة للسطح ، وهذا الضغط يؤثر على أى سطح موجود على هذا العمق فى السائل مهما كان اتجاهه . وهذا كله واضح بالنسبة للحالة المبينة فى الشكل ٩ — ١٢ . ولكن ماذا عن الحالة المبينة فى الشكل ٩ —١٣ ؟ هل الضغط متساو فى النقط A ، B ، C ؟



شكل (٩ — ١٣)
لماذا يقف السائل على نفس الارتفاع فى الانابيب الثلاثة كلها ؟

يجب أن يكون الضغط واحدا عند كل من هذه النقط والا انساب السائل فى اتجاه أو آخر فى الأنبوبة السفلية . من الواضح إذن أن شكل الوعاء غير هام . وعموما فإن المعادلة (٩ — ١٠) التى تعطى ضغط مائع ارتفاعه h صحيحة مهما كان نوع الوعاء الذى يحتوى على المائع . حاول بنفسك أن توضح لماذا تستطيع القوة الكلية الصغيرة المؤثرة عند قاعدة الأنبوبة B أن تحمل كمية كبيرة من السائل ، بينما تحمل نفس القوة كمية أقل من السائل عند A . تلميح : هل يحمل القمع أى كمية من السائل ؟

لنفرض الآن أن لدينا سائلا محبوسا فى وعاء كالمبين فى الشكل ٩ — ١٤ . وهذا الجهاز هو فى الواقع إحدى صور المكبس الايدرولى لنفرض ان A_1 و A_2 هما مساحتا مقطع الكباسين المبينين . وإذا لم تؤثر على الكباسين أى قوى ، وإذا كان وزن الكباسين مهملا فإن سطح السائل فى الأنبوبتين سيقع على نفس الارتفاع .



شكل (٩ — ١٤)
تستطيع قوة صغيرة مؤثرة على الكباس الصغير أن تتزن مع قوة كبيرة مؤثرة على الكباس الكبير .

وعندما تطبق قوة خارجية F_1 على الكباس 1 فإن الكباس 2 سوف يدفع إلى أعلى مالم تطبق عليه قوة F_2 . وإذا كانت F_2 كافية لمنع حدوث الحركة فإن السائل سوف يظل ساكنا . من الواضح إذن أن زيادة الضغط على الكباس 1 يجب أن تعادل بضغوط مساوية فى كل مكان فى السائل ، لأنه إذا لم يكن هذا صحيحا فإن الضغط غير المتزن سيسبب انسياب الماء . وهذا هو مثال **لقاعدة باسكال** . ويمكن صياغة هذه القاعدة كالتالى :

قاعدة باسكال

إذا طبق ضغط على سائل مقيد فإن هذا الضغط ينتقل إلى كل نقطة فى السائل

وبالطبع لابد أن يظل السائل ساكنا لكى يكون هذا صحيحا .

من المهم حساب القوة F_2 اللازمة للاتزان مع القوة F_1 .

الضغط الاضافى فى السائل نيتجة للقوة F_1 هو :

$$\Delta P = \frac{F_1}{A_1}$$

وطبقا لقاعدة باسكال ، تؤثر هذه الزيادة فى الضغط أيضا على الكباس 2 ، أى أن السائل يؤثر على الكباس 2 بقوة قدرها F_2 حيث :

$$F_2 = \Delta P A_2$$

وبالتعويض عن ΔP نجد أن :

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$$

وإذا كانت مساحة الكباس الثانى أكبر كثيرا من مساحة الكباس الأول ، فإن F_2 ستكون أكبر كثيرا من F_1 . لهذا فإن مثل هذا الجهاز قادر على أن يرفع ثقلا كبيرا باستخدام قوة صغيرة . ويمكنك أن تقتنع بنفسك ، بالرغم من ذلك ، بأن القوة الصغيرة F_1 تبذل كمية من الشغل تساوى F_2s تماما لكى ترفع الكباس الثانى مسافة s . وإذا لم يكن هذا صحيحا ، فإن هذا الجهاز يمكن تحويله إلى مكنة الحركة الدائمة .

٩ – ٩ نظرية ارشميدس

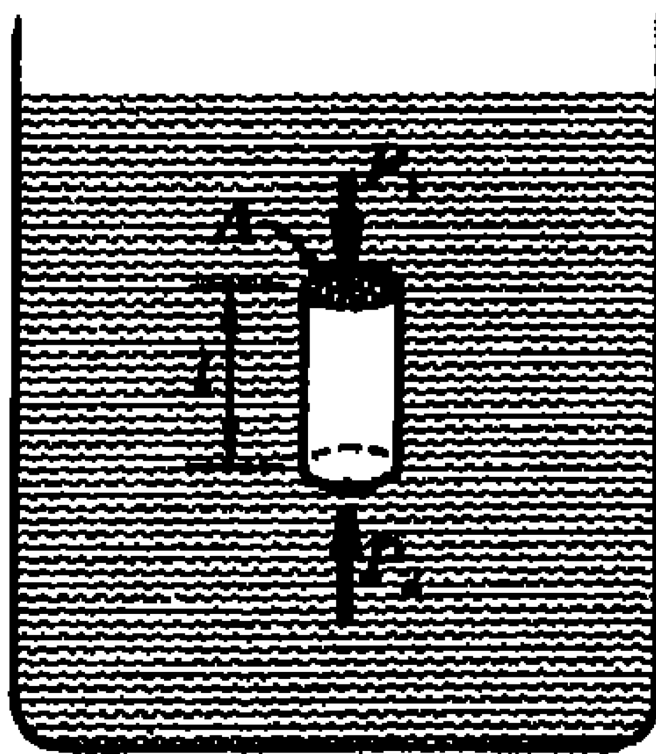
تطفو الأجسام على السوائل فى أحيان كثيرة كما نعلم جميعا ، وحتى إذا غاصت الأجسام فى السوائل فإنها تبدو أقل وزنا فى السائل منها عندما لاتغمر فيه . وتعكس هذه التأثيرات حقيقة أن هناك قوة متجهة إلى أعلى تساعد فى حمل الجسم المغمور ، وتسمى هذه القوة بقوة الطفو .

وتنص **قاعدة الطفو** ، التى كان ارشميدس اول مكتشف لها ، على الآتى :–

قاعدة ارشميدس

إذا غمر جسم جزئيا أو كليا فى سائل فإنه يدفع إلى أعلى بقوة تساوى وزن السائل الذى يزيحه الجسم .

فمثلا ، إذا انغمر جسم معين حجمه $3\ ft^3$ فى الماء فإن قوة الطفو (BF) المؤثرة عليه ستساوى وزن الماء المزاح ، أى وزن $3\ ft^3$ من الماء . وحيث أن الكثافة الوزنية للماء $62.4\ lb/ft^3$ فإن قوة الطفو ستكون (62.4) (3) ، أو 187 lb .



شكل (٩ – ١٥)
قوة الطفو المؤثرة على الاسطوانة تساوى وزن السائل المزاح .

وفى بعض الحالات يكون من السهل بمكان إثبات صحة قاعدة ارشميدس . اعتبر قطعة أسطوانية من مادة مغمورة فى سائل كما هو مبين فى الشكل ٩ – ١٥ . فى هذه الحالة تكون قوة الطفو المؤثرة على الأسطوانة هى الفرق بين القوة المؤثرة على القاعدة العلوية للأسطوانة P_2A ، والقوة المؤثرة على القاعدة السفلية للاسطوانة P_1A :

$$BF = P_2A - P_1A = A(P_2 - P_1)$$

ولكن $P_2 - P_1$ هو ببساطة ΔP ، أى فرق الضغط نتيجة لارتفاع من السائل قدره $l = h$ كما فى الشكل . وحيث أن $\Delta P = lD$ ، حيث D الكثافة الوزنية للسائل ، فإن :

$$\text{BF} = (Al)D$$

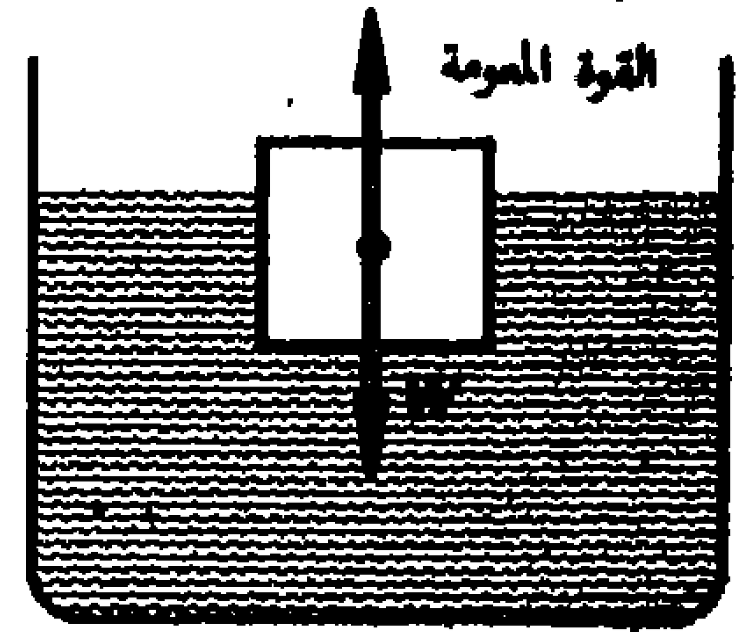
ولكن Al هو ببساطة حجم الاسطوانة المغمورة . نجد إذن أن :

$$\text{قوة الطفو} = (D)\,(\text{حجم الأسطوانة})$$

وحيث أن حجم الأسطوانة يساوى حجم السائل المزاح ، إذن الطرف الايمن للعلاقة السابقة هو وزن السائل المزاح ، أو :

$$\text{BF} = \text{وزن السائل المزاح}$$

وهذا هو نص قاعدة ارشميدس



شكل (٩ - ١٦)
ماهو الشرط اللازم تحقيقه حتى لايغطس المكعب ؟

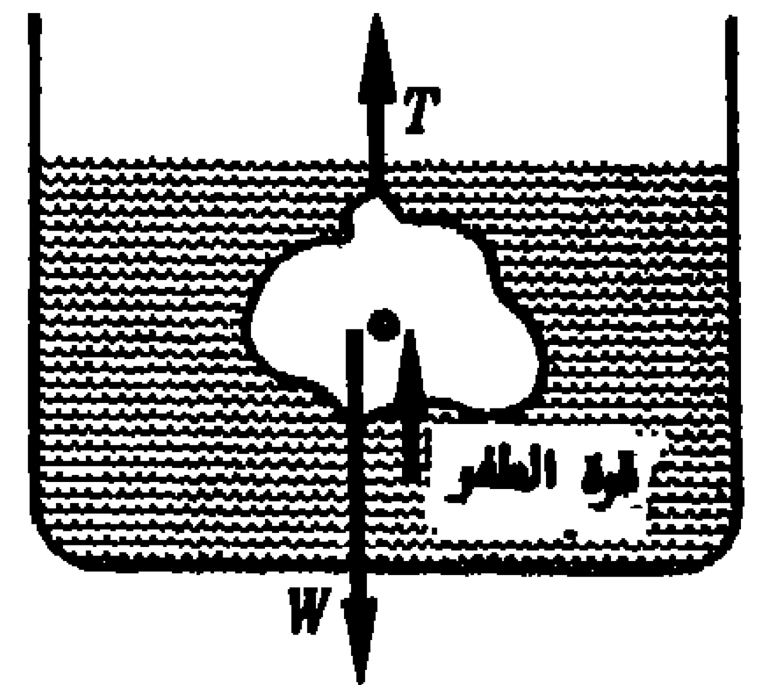
مثال توضيحى ٩ - ٣ : مكعب من الخشب طول كل من أضلاعه 2.0 ft يطفو على الماء بحيث ينغمس ثلاثة أرباعه . ماوزن هذا المكعب ؟

طريقة الحل : يمثل الشكل ٩ - ١٦ هذا الموقف . ونظر لأن المكعب طاف فإنه فى حالة توازن . من الواضح أن الوزن يتزن مع قوة التعويم . إذن :

$$W = \text{BF}$$

وحيث أن ثلاثة أرباع القالب الذى حجمه $8\ ft^3$ مغمورة فإن وزن الماء المزاح هو $(^3/_4)\,(8\ ft^3) = 6\ ft^3$ ولكن $D = 62.4\ lb/ft^3$ للماء ، إذن وزن الماء المزاح هو $(62.4\ lb/ft^3)(6ft^3) = 374\ lb$. وطبقا لقاعدة ارشميدس هذه الكمية تساوى ايضا BF وحيث أن $W = \text{BF}$ فإن :

$$W = \text{BF} = 374\ \text{lb}$$



شكل (٩ - ١٧)
يتعادل وزن الجسم مع مجموع قوة الطفو والشد فى الخيط

مثال توضيحى ٩ - ٤ : علقت قطعة معدنية كتلتها 20 g وكثافة مادتها $4.0\ g/cm^3$ فى خيط وغمست فى الزيت $(d = 1.50\ g/cm^3)$ كما هو مبين فى الشكل ٩ - ١٧ . ماقيمة الشد فى الخيط ؟

طريقة الحل : واضح من الشكل ٩ - ١٧ أن هناك ثلاث قوى تؤثر على الجسم . وحيث أنه فى حالة توازن فإن $\Sigma F_y = 0$ ومنه نجد أن :

$$T + BF - W_0 = 0$$

حيث W_0 وزن الجسم . يراد إيجاد T .

$$T = W_0 - BF$$

وحيث أن $W = mg$ ، إذن $W_0 = m_0 g$ حيث m_0 هى 0.020 kg .

لايجاد قوة الطفو BF يجب أن نلاحظ أنها تساوى وزن السائل المزاح بالجسم.ونحن نحتاج إلى إيجاد حجم السائل المزاح أولا ، ونحن نعلم أنه يساوى حجم الجسم . ومن تعريف الكثافة يمكننا أن نكتب العلاقة التالية بالنسبة للجسم :

$$d_0 = \frac{m_0}{V_0} \qquad \text{أو} \qquad V_0 = \frac{m_0}{d_0}$$

وهو ايضا حجم السائل المزاح V_f . إذن :

$$V_f = \frac{m_0}{d_0}$$

ومن تعريف الكثافة نجد أن كتلة السائل المزاح هى $V_f d_f$ ، وحيث أن $W = mg$ ، إذن وزن السائل المزاح هو :

$$W_f = m_f g = V_f d_f g$$

ولكن هذا الوزن هو أيضا قوة الطفو . وعليه فإن :

$$BF = V_f d_f g$$

وبالتعويض عن V_f بقيمته التى أوجدناها سابقا وهى m_0/d_0 نحصل على :

$$BF = m_0 g \frac{d_f}{d_0} \quad .$$

يمكننا الآن أن نعوض فى المعادلة الاصلية للشد T وهى بالتحديد :

$$T = W_0 - BF$$

لنحصل على :

$$T = m_0 g - m_0 g \frac{d_f}{d_0}$$

وباستخـــدام نظـــام الوحـــدات SI ‏ $m_0 = 0.020$ kg ، $g = 9.8$ m/s², $d_f/d_0 = 1.5/4.0,$ وبالتعويض عن هذه القيم نحصل على :

$$T = (0.0125 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 0.1225 \text{ N}$$

لاحظ أن الشد يكافىء وزن جسم كتلته 0.0125 kg .

٩ – ١٠ تعيين الكثافة

لنقضى الآن بعض الوقت فى مناقشة كيفية تعيين كثافة المواد . ونحن نعلم أن

$$D = \frac{W}{V} \quad \text{و} \quad d = \frac{m}{V}$$

إذن ، إذا اريد ايجاد d أو D يجب معرفة m أو W بالإضافة إلى حجم الجسم . ويمكن إيجاد قيمة m و W للجسم بسهولة باستخدام الميزان . وفى حالات معينة يمكن قياس الحجم باستخدام عدد القياس ذات الفكين أو القوارير الحجمية المدرجة . وإذا لم يكن ذلك ممكنا يوجد الحجم عادة باستخدام قاعدة ارشميدس .

ويمكن إيجاد حجم الجسم بمعلومية قوة الطفو BF المؤثرة عليه عندما يكون مغمورا فى سائل معلوم الكثافة . وحيث أن قاعدة ارشميدس تخبرنا أن :

$$\text{BF} = V_f D_f$$

(حيث يشير الدليل السفلى f إلى السائل ، وحيث ان $V_f = V_0$ عندما يكون الجسم مغمورا ، فإن :

$$V_0 = \frac{\text{BF}}{\text{D}_f} \quad \text{أو} \quad \text{BF} = V_0 D_f$$

اما قوة الطفو BF فتقاس بسهولة بوزن الجسم مرتين إحداهما فى الهواء والثانية عندما يكون مغمورا فى السائل . (فى القياسات ذات الدقة العالية يلزم إجراء تصحيح للتخلص من تقويم الهواء) . وحيث أن الفرق بين الوزنين هو BF ، إذن :

BF = الوزن W_1 فى الهواء – الوزن W_2 فى السائل

وبمعلوميه BF من هاتين القياستين يمكننا التعويض عنها وعن كثافة السائل المعلومة فى العلاقة التالية لنحصل على حجم الجسم :

$$V_0 = \frac{\text{BF}}{D_f}$$

من السهل إذن إيجاد كثافة الجسم . وإذا قيس وزن الجسم ، فإن :

$$D_0 = \frac{W_0}{V_0}$$

أما إذا كانت الكتلة معلومة ، فإن :

$$d_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

وحيث أن $W_0 = m_0 g$ ، من الواضح أن :

$$D = dg$$

إذن ، إذا أوجدنا D أو d يكون من السهل الحصول على الأخرى .

مثال توضيحى ٩ – ٥ : « وزنت » قطعة من الصخر فوجد أن « وزنها » 9.173 g ثم « وزنت » مرة أخرى عندما كانت مغمورة فى سائل كثافته 873 kg/m³ فوجد أن قيمة « وزنها » 7.261 g . اوجد كثافة مادة الصخرة .

ملحوظة : وضعت علامتى الاقتباس حول كلمتى « ونت » و « وزنها » لأن هذا الاستخدام دارج وليس علميا .

طريقة الحل : نعلم أن كتلة الجسم هى $m_0 = 9.173 \times 10^{-3}$ kg ولإيجاد حجم الجسم نستخدم حقيقة أن :

$$\mathrm{BF} = V_0 D_f = V_0 (873\ \mathrm{kg/m^3})(9.8\ \mathrm{m/s^2})$$

ولكن :

$$\mathrm{BF} = (9.173 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg} - 7.261 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{m/s^2})$$

وبالتعويض نحصل على :

$$V_0 = \frac{9.173 - 7.261}{0.873} \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3} = 2.190 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3}$$

وحيث أن $d = m/V$، إذن :

$$d_0 = \frac{9.173 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg}}{2.19 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3}} = 4190\ \mathrm{kg/m^3}$$

مثال توضيحى ٩ – ٦ : وجد أن جسما ما « يزن » 24 g فى الهواء و 16 g عندما كان مغمورا فى الماء و 12 g فقط عندما كان مغمورا فى سائل من نوع معين ماهى كثافة السائل ؟

طريقة الحل : حيث أن $(\mathrm{BF})_w = V_0 D_w$ اذن :

$$V_0 = \frac{(0.024\ \mathrm{kg} - 0.016\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{m/s^2})}{(1000\ \mathrm{kg/m^3})(9.8\ \mathrm{m/s^2})} = 8.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3} = 8.0\ \mathrm{cm^3}$$

حيث يشير الدليل السفلى w الى الماء . وهذا هو ايضا حجم السائل المزاح V_f

ولكن وزن السائل المزاح W_f يساوى BF عندما يكون الجسم مغمورا فى السائل :

$$W_f = (0.024\ \text{kg} - 0.012\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)$$

وحيث أن $D_f = W_f/V_f$ ، اذن :

$$D_f = \frac{(0.024\ \text{kg} - 0.012\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)}{8.0 \times 10^{-6}\ \text{m}^3} = 14{,}700\ \text{N/m}^2$$

وإيضا ، حيث أن $d_f = D_f/g$ إذن :

$$d_f = \frac{14{,}700\ \text{N/m}^2}{9.8\ \text{m/s}^2} = 1500\ \text{kg/m}^3$$

٩ – ١١ البارومتر (مقياس الضغط)

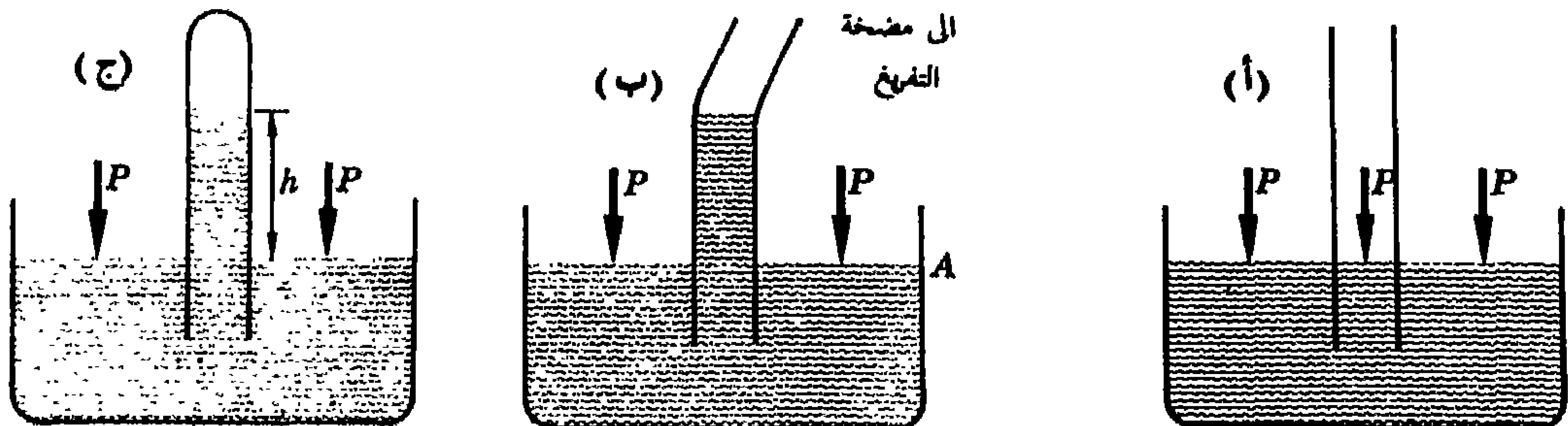
لنعد الآن الى مناقشة ضغط المائع وتأثيراته . يعتبر الهواء المحيط بنا مائعا هاما جدا ، اذ أن الضغط فى داخله ذو أهمية كبيرة لنا ، وسنرى أن الضغط الجوى متغير مؤثر فى عمليات كثيرة . وسوف نناقش فى هذا الجزء طرق قياس الضغط الجوى .

من المعروف لنا جميعا أن الضغوط البارومترية المتزايدة تسبق عادة الجو الحسن ، بينما تعتبر الضغوط البارومترية المتناقصة أو المنخفضة من مميزات الجو السيىء .

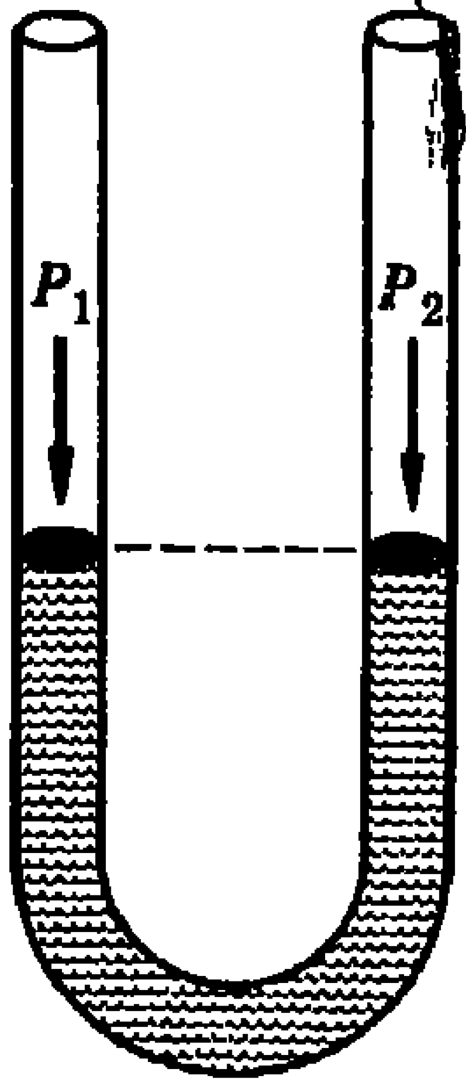
ويذكر الضغط البارومترى اليومى فى كثير من التقارير الجوية ، وهو واحد من البيانات الأساسية فى التنبؤ الجوى . والضغط البارومترى ليس مهما فى هذا التطبيق فقط ، ولكنه يستخدم أيضا فى اغراض كثيرة أخرى . فمثلا ، تتغير درجة غليان السوائل بتغير الضغط الجوى ، ولهذا نحتاج الى معرفة الضغط البارومترى عادة فى المختبرات . لنفحص الآن عمل البارومتر .

إعتبر الموقف المبين فى الشكل ٩ – ١٨ أ الذى يمثل كأسا مملوءة بالزئبق وأنبوبة زجاجية مفتوحة منغمسة فيه . وحيث أن سطحى الزئبق داخل الأنبوبة وخارجها مفتوحان على الهواء فإن ضغطى الهواء عليهما متساويان . وينشأ ضغط الهواء نتيجة لوزن الهواء الموجود فوق الأرض .

شكل (٩ – ١٨)
عندما تفرغ الأنبوبة يرتفع الزئبق بداخلها حتى تتحقق العلاقة $hD = P$ ومن ثم فإن هذا الجهاز ، البارومتر ، قادر على قياس الضغط .



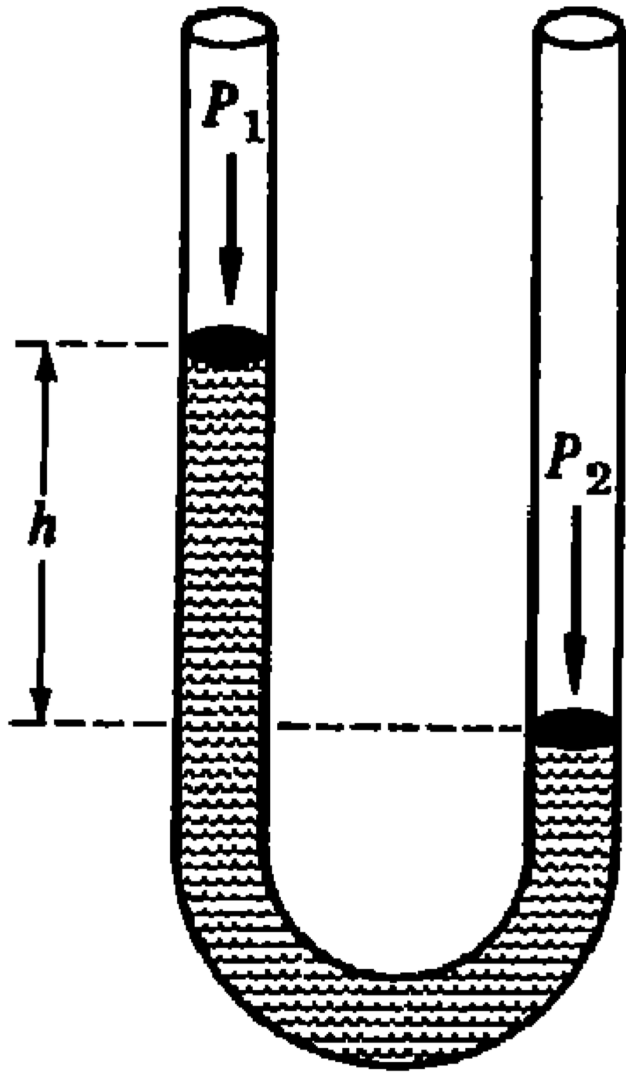
واذا وصلت مضخة تفريغ مثالية بطرف الأنبوبة كما هو مبين فى الشكل ٩ – ١٨ ب فإن المضخة سوف تفرغ الأنبوبة من الهواء ، وبذلك يقل الضغط على سطح الزئبق بداخلها الى الصفر . (تذكر أن ضغط الغاز على سطح ينشأ نتيجة لتصادم جزيئات الغاز بهذا السطح . واذا لم تكن الجزيئات موجودة فمن الواضح أن الضغط سيكون صفرا . وهذا مانعنيه بالفراغ المثالى) ، والآن اصبحت هناك قوة غير متزنة تؤثر على سطح الزئبق وتحاول أن ترفع الأنبوبة إلى أعلى . عندئذ سيرتفع الزئبق فى الأنبوبة إلى ارتفاع معين حيث يكون الضغط عند المستوى A نتيجة لعمود الزئبق مساويا للضغط الجوى P. وهذا صحيح لأن الضغط على مستوى معين فى السائل يجب أن يكون متساويا فى كل مكان ، وإلا تدفق السائل حتى يتساوى الضغط .



(أ)

وفى النهاية تسد الأنبوبة المفرغة باحكام كما هو مبين فى الشكل ٩ – ١٨ جـ بحيث يظل الضغط عند قاعدة عمود الزئبق يساوى الضغط الجوى بالضبط ، فإن :

$$P = hD = hdg$$



(ب)

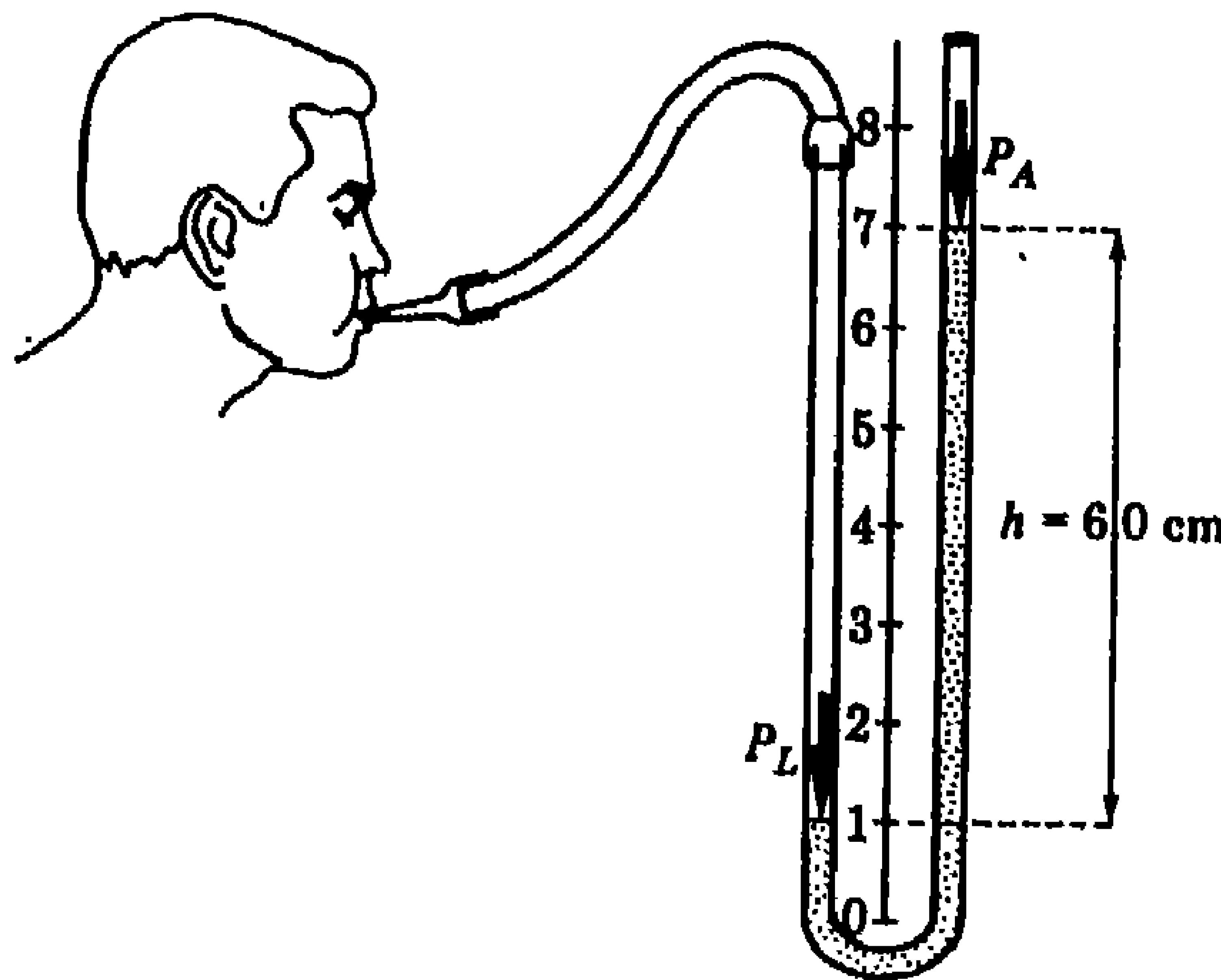
شكل (٩ – ١٩)
فى المانومتر يقاس فرق الضغط $P_2 - P_1$ بالارتفاع h .

وحيث أن كثافة الزئبق D معلومة ، فيمكننا إيجاد الضغط الجوى بسهولة بقياس ارتفاع عمود الزئبق اللازم للاتزان مع الضغط الجوى . وفى الحقيقة ، يعبر عن الضغط فى أحيان كثيرة جدا بعدد البوصات أو السنتيمترات من الزئبق . فالضغط الجوى العيارى يساوى $760\ mm.\ Hg$ وبالطبع فإن هذا الضغط هو فى الحقيقة $hdg = (0.76)(13{,}600)(9.8)\ N/m^2 = 1.0 \times 10^5\ N/m^2$ لماذا ؟ حيث أن 1 in تساوى 2.54 cm، 760 mm Hg تكافىء حوالى 30 in Hg .

والبارومترات الزئبقية التجارية ماهى إلا صور محسنة من الجهاز المبين فى الشكل ٩ – ١٨جـ ، فهى مزودة بمقياس دقيق بجانب عمود الزئبق وأجهزة خاصة لضبط مستوى الزئبق فى الكأس . ومع ذلك فإنها أساسا كما هو مبين فى الشكل . وهناك أنواع أخرى من البارومترات مبنية على أسس مختلفة ، ولكن البارومتر الزئبقى يفضل فى القياسات الدقيقة . ومع ذلك فإن طول البارومتر الزئبقى لايجب أن يقل عن 760 mm ، ولهذا يكون من المنطقى احيانا استبداله بجهاز آخر اصغر ولكن اقل منه دقة .

هناك جهاز آخر يستخدم لقياس ضغوط الغازات بدقة ويسمى **المانومتر** (شكل ٩ – ١٩) . وبالرغم من أن هناك طرازات عديدة من المانومترات فإن المانومتر هو أساسا أنبوبة على شكل الحرف U مملوءة جزئيا بسائل كالزئبق . واذا كان سطحى الزئبق فى الأنبوبتين فى مستوى واحد كما هو مبين فى الجزء أ ، فإن هذا يعنى أن ضغطى الغازين الموجودين فوق العمودين P_1 ، P_2 لابد أن يكونا متساويين . وإذا كان

P_2 اكبر من P_1 فإن ارتفاعى عمودى الزئبق سيتغيران ليصبحا كما هو مبين فى الجزء ب . وفى هذه الحالة يعطينا الفرق بين ارتفاعى العمودين h مقاسا بالسنتيمترات فرق الضغط P_2-P_1 مقدرا بالسنتيمترات من الزئبق . وعادة يكون احد العمودين مفتوحا على الجو ، ولنفرض أن P_1 هو الضغط الجوى . عندئذ يكون P_2 هو الضغط المانومترى مضافا اليه h . وفى حالة الفروق الصغيرة فى الضغط يكون من المناسب استخدام سائل أقل كثافة من الزئبق . فإذا استخدم سائل كثافته d بدلا من الزئبق فإن الفرق بين مستويى سطحيه فى الأنبوبتين سوف يزداد بمقدار $13,600/d$ ، حيث d مقاسة بالكيلوجرامات لكل متر مكعب . هل يمكن أن تشرح لماذا ؟



شكل (٩ - ٢٠)
بالنفخ فى المانومتر يستطيع الشخص أن يحمل عمودا من المائع ارتفاعه 6.0 cm Hg . ماهى قيمة P_L ؟

مثال توضيحى ٩ - ٧ : فى أحد الاختبارات البسيطة للرئتين يطلب من المريض أن ينفخ بكل قوته عمود الزئبق فى إحدى أنبوبتى المانومتر كما هو مبين فى الشكل ٩ - ٢٠ . افترض ان المانومتر الزئبقى قد استخدم فى حالة معينة ، وأن مستويى السائل فى أنبوبتى المانومتر كانا كما بالشكل . ماقيمة الضغط داخل رئتى المريض . (لايستخدم الزئبق عادة فى مثل هذا الاختبارات لأن بخار الزئبق خطر عند تكرار التعرض إليه) .

طريقة الحل : لنفرض أن P_L هو ضغط الهواء فى الرئتين . الضغط فى الجانب الأيسر للمانومتر قريب جدا من P_L وهذا الضغط يتزن مع الضغط الجوى مضافاً إليه الضغط الناتج من العمود $h = 6.0$ cm Hg . إذن :

$$P_L = 6.0 \text{ cm Hg} + P_A$$

وعادة يكون P_A حوالى 76 cm Hg ، ومن ثم فإن $P_L = 82$ cm Hg . (وبالطبع يجب قياس P_A باستخدام البارومتر إذا أريد الحصول على نتيجة دقيقة) . وبحيث أن ضغط عمود من المائع ارتفاعه h هو hdg فإن :

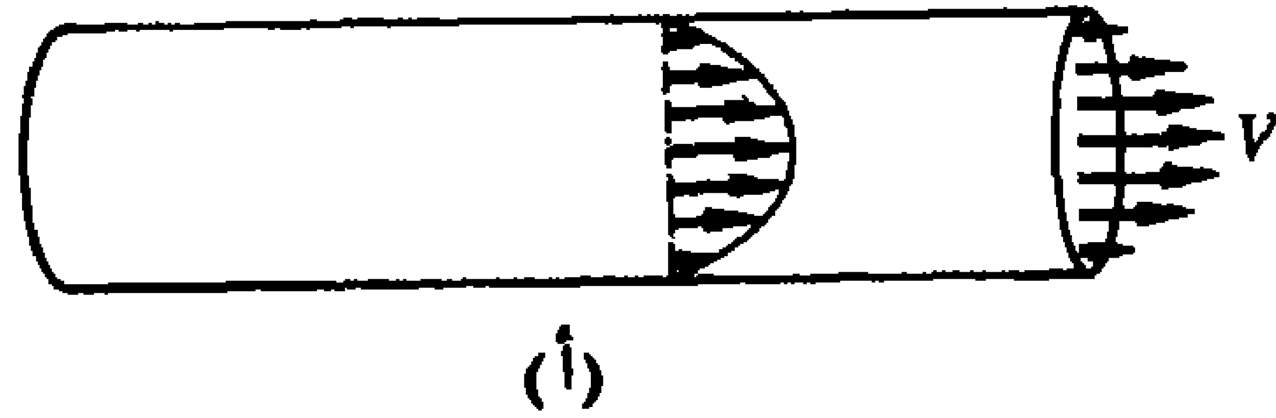
$$P_L = 82 \text{ cm Hg} = (0.82 \text{ m})(13,600 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)$$
$$= 1.093 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.08 \text{ atm}$$

وقد أعطيت تحويلات وحدات الضغط من صورة إلى أخرى فى جدول معاملات التحويل فى بطن الغلاف الأمامى .

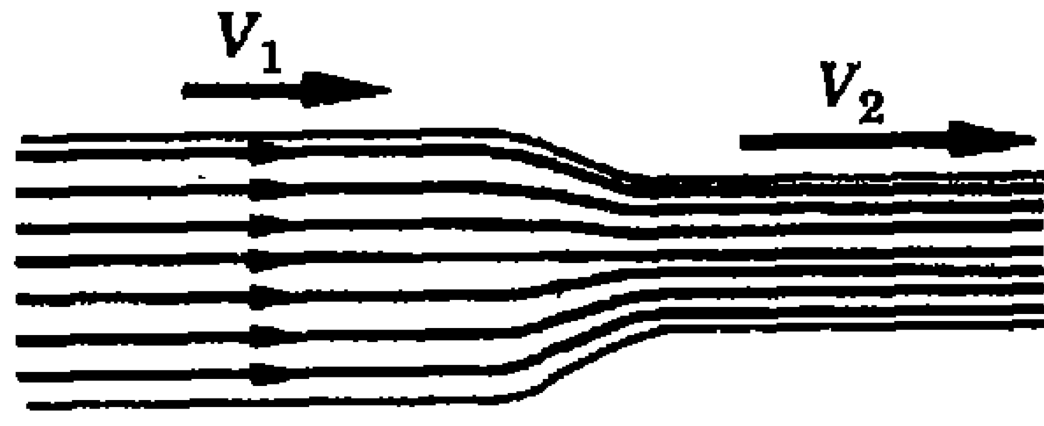
٩ - ١٢ الموائع المتحركة

ناقشنا حتى الآن الموائع الساكنة ، ولكن الموائع المتحركة هامة بدرجة كبيرة أيضا . ويمكنك أن تعلم الكثير عن ذلك بفحص انسياب الموائع خلال المواسير . ويمثل الشكل ٩ - ٢١ السلوك النموذجى للموائع المتحركة .

نرى من الجزء أ من الشكل أن المائع لايتحرك فى الماسورة ببساطة ككتلة واحدة ، وبدلا من ذلك نلاحظ أن المائع القريب من جدران الماسورة يتحرك ببطء شديد للغاية . وواضح أيضا من جانبية السرعات أن المائع القريب من مركز الماسورة يتحرك بأكبر سرعة . وهذا التغير فى السرعة عبر مقطع الماسورة يسبب احتكاك المائع القريب من مركز الماسورة بالجزء الخارجى من المائع . نتيجة لذلك يحدث فقدان احتكاكى للطاقة فى عملية الانسياب ، وسنتكلم عن ذلك بشكل أكثر تفصيلا فيما بعد .



(أ)



(ب)



(ج)

شكل (٩ - ٢١)
أمثلة للملامح المختلفة للانسياب فى أنبوبة :
(أ) جانبية السرعات .
(ب) الخطوط الانسيابية ،
(ج) الدفق المضطرب .

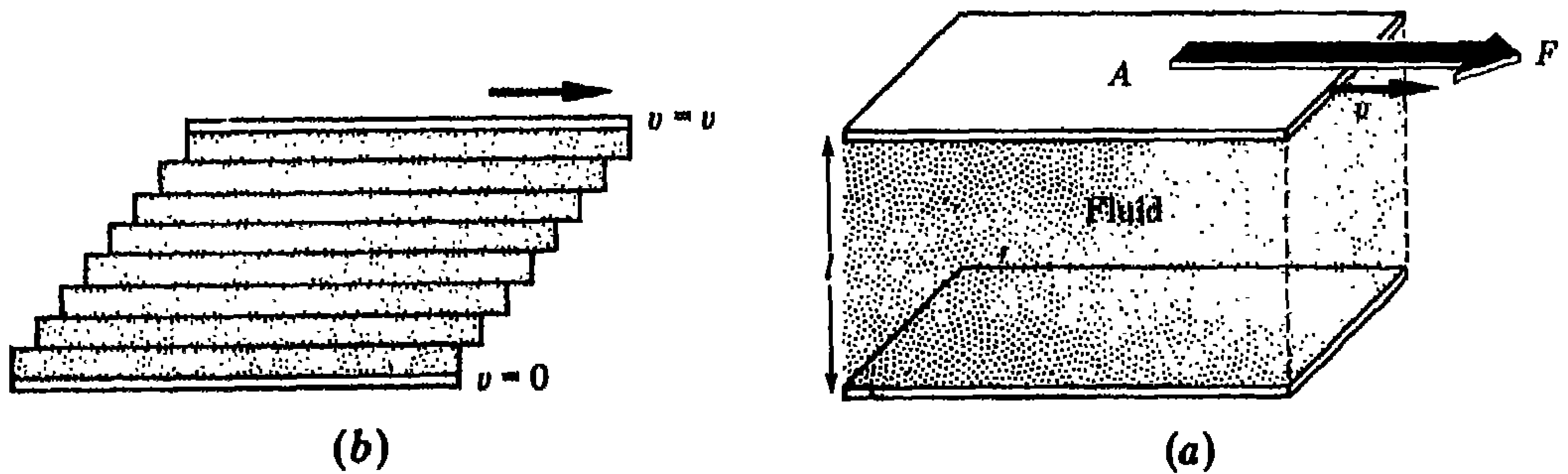
يوضح الجزء ب من الشكل الخطوط الانسيابية فى حالة الانسياب البسيط . وهذه الخطوط تبين المسار الذى يتبعه جسيم دقيق فى المائع أثناء حركته فى الماسورة . ويسمى هذا النوع من الانسياب **بالانسياب الطبقى** .

لاحظ أيضا فى هذا الشكل أن سرعة الانسياب تتغير بتغير مساحة المقطع ، وتكون سرعة المائع أقل فى المنطقة ذات المقطع الكبير .

ويوضح الجزء جـ من الشكل مايحدث إذا أصبح الانسياب سريعا جدا عند مرور المائع بعائق ما ، وفى هذه الحالة لن تكون الخطوط الانسيابية ملساء كما فى الحالة السابقة . وعندما يندفع المائع على العائق فإنه يبدأ فى التحرك حركة دوامية عشوائية ، ولهذا لن يمكننا التنبوء بالمسار الحقيقى الذى يتبعه جسم صغير فى المائع . ويقال عندئذ أن هذه المنطقة التى تتغير فيها الخطوط الانسيابية باستمرار هى منطقة **تدفق مضطرب** . وكما قد تتوقع ، كمية الطاقة المفقودة نتيجة للتأثيرات الاحتكاكية أكبر كثيرا فى حالة التدفق المضطرب منها فى حالة الانسياب الطبقى . ويجب أن نشير هنا إلى أن التدفق المضطرب يحدث أيضا فى الأنبوبة المنتظمة حتى إذا لم يكن العائق موجودا ، بشرط أن يكون معدل الدفق كبيرا بدرجة كافية .

٩ - ١٣ اللزوجة

رأينا فى الجزء السابق أن التأثيرات الاحتكاكية تحدث فى المائع المتدفق ، ويوصف هذا التأثير بدلالة **لزوجة المائع** . وتعتبر اللزوجة مقياسا لمقدار القوة اللازمة لانزلاق طبقة من السائل على طبقة اخرى . والمواد التى لاتنساب بسهولة ، وهى المواد الغليظة جدا كالقار أو الشراب المركز ، لزوجتها كبيرة . أما المواد التى تنساب بسهولة (كالماء) فلزوجتها صغيرة .



شكل (٩ - ٢٢)
عندما يتحرك اللوح العلوى تنزلق طبقات المائع بعضها فوق بعض .

لكى نعطى معناً كميا للزوجة سنستعين بتجربة القص التخيلية الموضحة فى الشكل ٩ - ٢٢ . ونحن نرى فى هذا الشكل لوحين متوازيين مساحة كل منهما A تفصلهما مسافة قدرها l . لنفرض أن المنطقة بين اللوحين مملوءة بمائع نرمز إلى لزوجته بالرمز η (الحرف اليونانى ايتا) . لكى نتمكن من تحريك اللوح العلوى بسرعة قدرها v بالنسبة للوح السفلى تلزمنا قوة معينة . وبالطبع فإن هذه القوة ستكون كبيرة إذا كانت لزوجة المائع كبيرة . تعرف η بالعلاقة التالية :

$$\eta = \left(\frac{F}{A}\right)\left(\frac{l}{v}\right) \qquad (٩ - ١١) \quad \text{اللزوجة}$$

وحدات اللزوجة فى النظام SI طبقا للمعادلة (٩ — ١١) هى النيوتن ثانية لكل متر مربع . ومع ذلك فإن η تدرج فى الجداول فى أحيان كثيرة بدلالة وحدة تسمى بويز (P) . وترتبط هذه الوحدة بوحدة اللزوجة فى النظام SI بالعلاقة :

$$1 \text{ SI viscosity unit} = 1 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$$

ويستنتج البويز من المعادلة (٩ — ١١) عند استخدام النظام cgs ويمثل الجدول ٩ — ٣ بعض قيم اللزوجة لموائع معروفة .

جدول ٩ — ٣

لزوجة بعض السوائل والغازات عند 30°C .

المادة	اللزوجة* cP
هواء	0.019
اسيتون	0.295
كحول ميثيل (ميثانول)	0.510
بنزين	0.564
مـاء	0.801
كحول ايثيل (ايثانول)	1.00
بلازما الدم	~1.6
زيت SAE No.10	200
جلسرين	629
جلوكوز	6.6×10^{13}

* وحدة اللزوجة فى النظام SI هى $1000 \text{ cp} = 1 \text{ N.S/m}^2$.

يمكننا التعرف على معنى اللزوجة بصورة أكثر وضوحا بفحص الشكل ٩ — ٢٢ب . لاحظ أن طبقتى المائع الملامستين للوحين تظلان ملتصقتين بهما . ويمكننا اعتبار أن المائع الموجود بين اللوحين مكون من كثير من الطبقات الرقيقة ، أكثر كثيرا مما هو مبين . وعندما يتحرك اللوح العلوى تنزلق هذه الطبقات كل منها على الأخرى ويكون الانزلاق صعبا إذا كانت لزوجة المائع كبيرة . وعندما تنزلق الطبقات على بعضها البعض تبذل كمية كبيرة من الشغل . ولهذا السبب فإن الشغل المبذول ضد قوى اللزوجة يكافىء شغل الاحتكاك .

٩ — ١٤ قانون بوازيل

من المفيد فى كثير من الأحيان معرفة حجم المائع الذى ينساب خلال ماسورة فى وحدة الزمن . وتعرف هذه الكمية باسم **معدل الدفق** وسنرمز لها هنا بالرمز Q . من التعريف :

$$Q = \text{الحجم المنساب من الأنبوبة فى الثانية}$$

لنرجع الى الشكل ٩ – ٢٣ لنتبين كيف يعتمد Q على المتغيرات الموضحة فى هذا الشكل .

من المعقول أن نعتقد أن المائع ينساب بمعدل أكبر إذا كان فرق الضغط $(P_1 - P_2)$ كبيرا ، ولهذا يمكننا أن نقول أن Q يتناسب مع الضغط الدافع $(P_1 - P_2)$. وكلما ازداد طول الماسورة كلما زادت مقاومتها للانسياب . إذن Q يجب أن يتناسب عكسيا مع L . ولكن معدل الدفق يجب أن يزداد بزيادة مقطع الماسورة ، وعليه فإن Q يجب أن يزيد بزيادة R . وفى النهاية ، كلما كانت اللزوجة η كبيرة كلما كان معدل الدفق صغيرا .

كان بوازيل (الذى سميت وحدة اللزوجة نسبة إليه) أول من أوجد العلاقة الرياضية المضبوطة لمعدل الدفق Q بدلالة $P_1 - P_2$ ، L ، R ، η . وقد أثبت أن Q فى حالة الانسياب الطبقى المائع فى ماسورة طولها L ونصف قطرها R يعطى بالعلاقة :

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L} \qquad (٩ - ١٢)$$

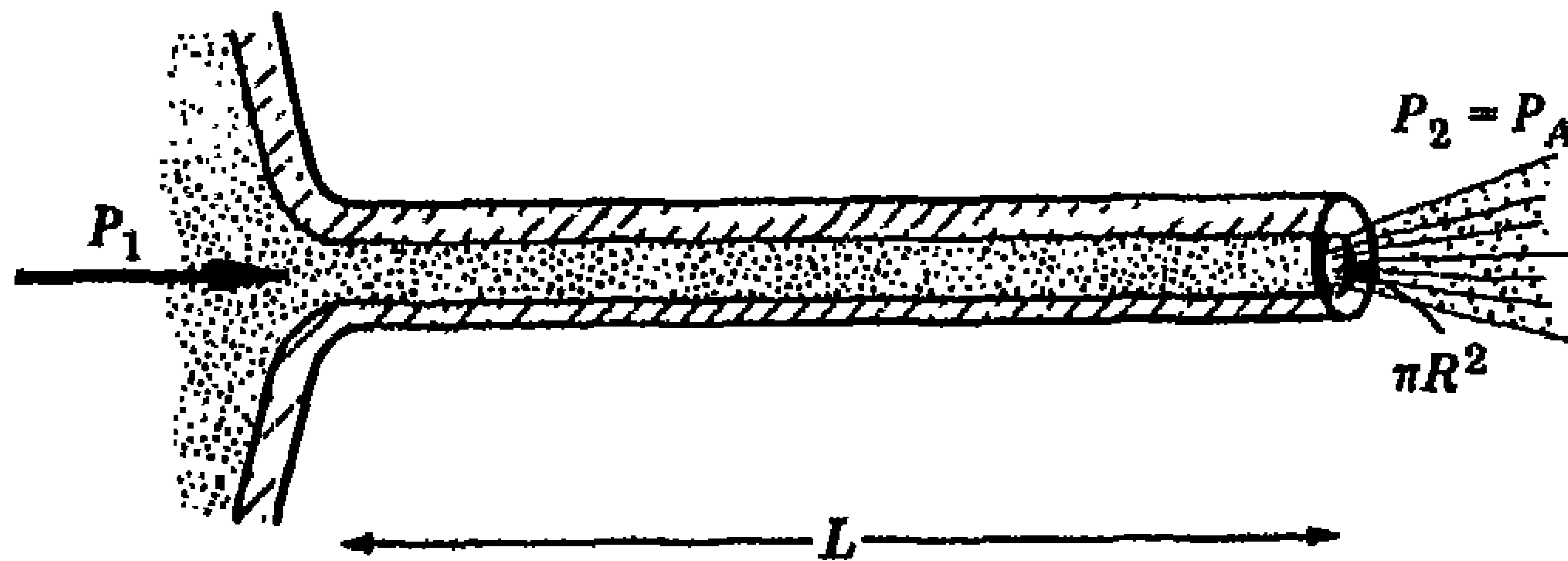
وتسمى هذه العلاقة قانون بوازيل . لاحظ أن Q يتناسب مع نصف قطر الماسورة R مرفوعا إلى الأس الرابع .

مثال توضيحى ٩ – ٨ : لزوجة الماء تساوى 0.801 cp (centipoise) عند 30°C ، ماهى كمية الماء المنسابة فى كل ثانية خلال أنبوبة شعرية طولها 20 cm ونصف قطرها 0.15 cm إذا كان فرق الضغط عبر الأنبوبة 3.0 cm Hg ؟

طريقة الحل : لدينا الكميات المعلومة الآتية :

$$L = 0.20 \text{ m} \qquad R = 0.15 \times 10^{-2} \text{ m}$$
$$\eta = 0.801 \text{ cP} = 0.801 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$
$$P_1 - P_2 = 3.0 \text{ cm Hg} = (\tfrac{3.0}{76})(1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) = 0.40 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

اجريت عملية تحويل وحدات الضغط هنا باعتبار أن $1 \text{ atm} = 76 \text{ cm Hg} = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ • بالتعويض عن هذه الكميات فى المعادلة (٩ – ١٢) نجد أن :



شكل (٩ – ٢٣) يتناسب معدل الدفق مع $(P_1 - P_2)R^4/\eta L$ طبقا لقانون بوازيل .

$$Q = 5.0 \times 10^{-5}\ m^3/s = 50\ cm^3/s$$

مثال توضيحى ٩ – ٩ . يتركب مقياس اللزوجة الشعرى من أنبوبة شعرية رأسية تنساب خلالها كمية ثابتة من السائل ويقاس زمن انسيابها . وقد وجد أن زمن انسياب البنزين فى مقياس لزوجة معين هو 206.3 s عند 30°C بينما كان زمن انسياب محلول مخفف جدا من البنزين هو 309.7 s عند نفس درجة الحرارة . أوجد لزوجة المحلول .

طريقة الحل : كثافة المحلول المخفف قريبة جدا من كثافة البنزين . ومن ثم فإن الضغط الحافز سيكون واحدا بالنسبة للمحلول والمذيب . وطبقا لقانون بوازيل نرى أن العامل الوحيد الذى يؤثر على Q الذى يختلف فى التجربتين هو اللزوجة η اذن:

$$\frac{\eta\ \text{للمذيب}}{\eta\ \text{للمحلول}} = \frac{\text{زمن انسياب المذيب}}{\text{زمن انسياب المحلول}}$$

من الجدول ٩ – ٣ نجد أن لزوجة البنزين عند 30°C هى 0.564 cp . إذن ، بالتعويض عن الكميات المعلومة نجد أن :

$$\frac{206.3}{309.7} = \frac{0.564\ cP}{\eta\ \text{للمحلول}}$$

$$\eta\ \text{للمحلول} = 0.847\ cP$$

مثال توضيحى ٩ – ١٠ : يتعرض المسنون كثيرا لمشاكل متعلقة بدوران الدم نتيجة لتراكم الزواسب فى الشرايين ، بأى معامل يقل معدل انسياب الدم إذا نقص نصف قطر الشريان إلى النصف ؟ افترض تساوى فرق الضغط فى الحالتين .

طريقة الحل : يخبرنا قانون بوازيل أن حجم الدم Q المنساب خلال الشريان فى الثانية يرتبط بنصف قطره R طبقا للعلاقة :

$$Q \propto R^4$$

وعليه فإن $Q_0 =$ (ثابت) $(R_0{}^4)$ بالنسبة للشريان الأصلى بينما $Q =$ (ثابت) $(R_0/2)^4$ بالنسبة للشريان الضيق . من هاتين المعادلتين نجد ان $Q/Q_0 = 1/16$ أى أن معدل الانسياب يقل بمعامل قدره 16 . وواضح من حقيقة أن Q يعتمد بشدة على R لماذا تنشأ مشاكل دوران الدم من رواسب الشرايين .

٩ – ١٥ معادلة برنولى للسوائل المتحركة

رأينا مما سبق أن لكل سائل لزوجة مميزة . وإذا كانت اللزوجة كبيرة يكون من الضرورى بذل شغل كبير لدفع السائل فى الماسورة ، وتفقد هذه الطاقة نتيجة لاحتكاك الجزيئات بعضها ببعض فى السائل ، وتظهر هذه الطاقة المفقودة فى نهاية الأمر على هيئة حرارة .

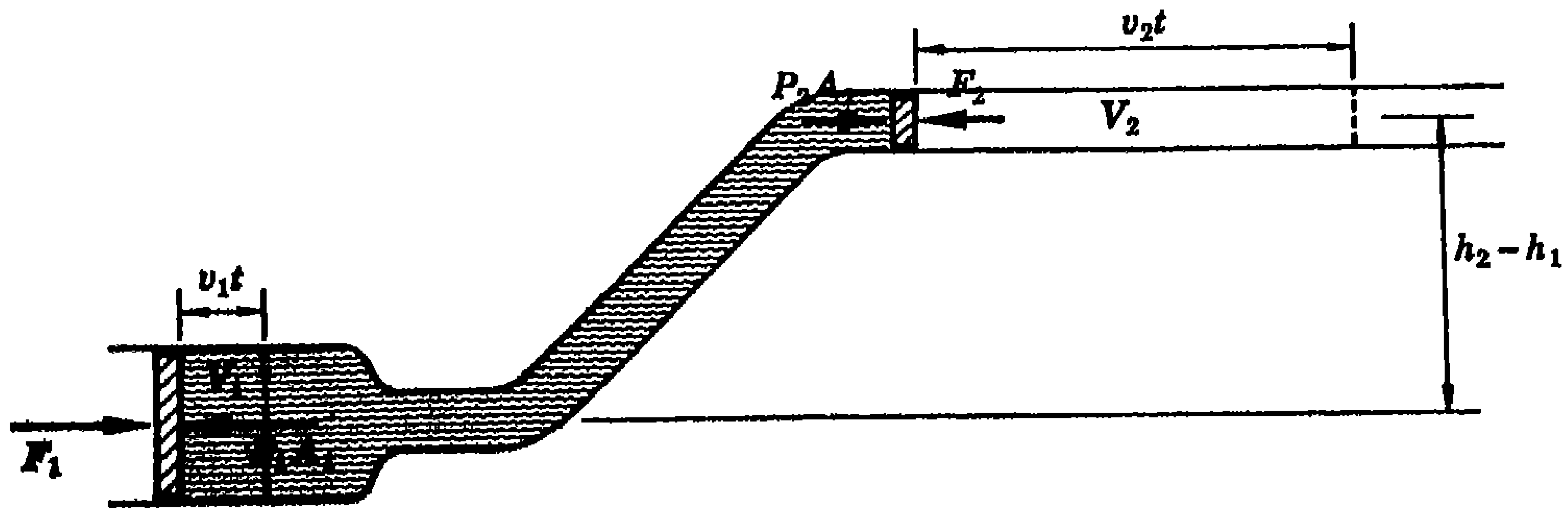
وتمتاز بعض السوائل بأن لزوجتها صغيرة لدرجة يمكن معها اهمال الطاقة المفقودة نتيجة للتأثيرات الاحتكاكية ، على الأقل فى حالات معينة . وفى هذه الحالة الهامة يمكن إيجاد علاقة بسيطة للضغط فى المائع ، وتسمى هذه العلاقة **معادلة برنولى** التى نشرها دانييل برنولى فى عام ١٧٣٨ .

اعتبر الماسورة المبينة فى الشكل ٩ – ٢٤ والمملوءة تماما بسائل بين كباسين لااحتكاكيين . وافترض أن الكباس السفلى يدفع إلى اليمين بسرعة ثابتة قدرها v_1 وأن الكباس العلوى يتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v_2 . فى هذه الحالة تتزن القوة المؤثرة على الكباس السفلى F_1 مع القوة الناتجة من ضغط السائل P_1A_1 حيث A_1 مساحة الكباس السفلى . (لابد أن تتعادل القوتان المؤثرتان على الكباس وإلا تسارع هذا الكباس ، وقد ذكرنا سابقا أنه يتحرك بسرعة ثابتة) . بالمثل $F_2 = P_2A_2$ بالنسبة إلى الكباس العلوى . وحيث أن المسافة التى يتحركها الكباس السفلى فى زمن قدره t هى v_1t ، إذن حجم السائل الذى يدفعه هذا الكباس هو $(v_1t)(A_1)$. وإذا كان السائل لاينضغط فإن الكباس العلوى يجب أن يفسح مكانا لحجم مساو من السائل . إذن :

$$(v_1t)(A_1) = (v_2t)(A_2)$$

وقد تساءل برنولى عما يحدث للشغل بواسطة الكباس 1 وهذا الشغل يساوى بالطبع $F_1(v_1t)$ أو :

$$\text{شغل الدخل} = P_1A_1v_1t$$



شكل (٩ – ٢٤) الشغل المبذول بواسطة F_1 يجب أن يكون مساويا للشغل المبذول ضد القوة F_2 مضافا إليه التغير فى طاقة حركة السائل وطاقة وضعه .

لأن $P_1A_1 = F_1$. وحيث أن الكباس 2 يبذل كمية من الشغل قدرها $F_2(v_2t)$ فإن جزءا من شغل الدخل قد انتقل إلى هذا الكباس .

بالإضافة إلى ذلك فإن السائل الذى يدفعه الكباس إلى اليمين،ينتقل بالطبع إلى الأنبوبة العلوية . ونتيجة لذلك يكتسب هذا السائل (وحجمه A_1v_1t) كمية معينة من طاقة الوضع . علاوة على ذلك حيث أن السائل يتحرك الآن ، بسرعة أكبر هى $\bar{v}_2$ ، فإن طاقة حركته سوف تتغير ايضا . وبالطبع يفقد بعض الطاقة كشغل احتكاك اللزوجة فى هذه العملية ، ولكننا نفترض أن هذا الجزء صغير ويمكن إهماله . إذن :

التغير فى طاقة الحركة + التغير فى طاقة الوضع + شغل الخرج = شغل الدخل .

أو ، باستخدام رموز الشكل ٩ — ٢٤ :

$$P_1A_1v_1t = P_2A_2v_2t + Mg(h_2 - h_1) + (\tfrac{1}{2}Mv_2^2 - \tfrac{1}{2}Mv_1^2)$$

ولكن حجم السائل المعنى هو A_1v_1t ولهذا فإن كتلته يمكن إيجادها من تعريف الكثافة . إذن كتلة السائل :

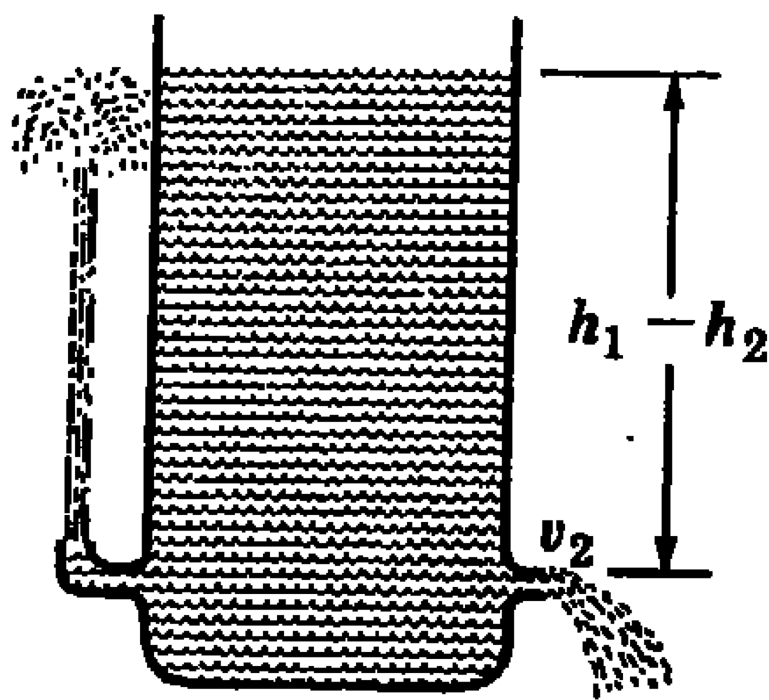
$$M = dA_1v_1t = dA_2v_2t$$

وبالتعويض عن كتلة السائل فى المعادلة السابقة وإعادة ترتيب حدودها نحصل على المعادلة التالية :

معادلة برنولى

$$P_1 + \tfrac{1}{2}v_1^2d + gh_1d = P_2 + \tfrac{1}{2}v_2^2d + gh_2d$$

وهذه هى **معادلة برنولى** . وواضح أنه من غير الضرورى وجود الكباسين ، فالنقطتان 1 و 2 يمكن أن تكونا أى نقطتين فى السائل . وكل مانحتاجه هو سطحين فى السائل ، وقد يكون هذان السطحان تخيليين ، ولكن الحسابات ستظل واحدة دون أى تغيير . لاحظ ، مع ذلك ، أن هذه المعادلة تنطبق إذا كان من الممكن إهمال فواقد الاحتكاك فقط .



شكل (٩ — ٢٥)
تستخدم نظرية توريشللى لإيجاد سرعة تدفق سائل من ذيل ماسورة .

٩ — ١٦ نظرية توريشللى

مثال توضيحى ٩ — ١١ . يمثل الشكل ٩ — ٢٥ تطبيقا بسيطا لمعادلة برنولى . افترض أن هناك ذيل ماسورة صغيرة فى خزان كبير من السائل كما هو مبين . إوجد السرعة التى ينساب بها الماء من ذيل الماسورة الأيمن .

طريقة الحل . حيث أن ذيل الماسورة صغير جدا ، فإن سرعة التدفق v_2 ستكون أكبر كثيرا من سرعة السطح العلوى للماء v_1 . يمكننا إذن تقريب v_1 واعتبارها صفرا . وعليه يمكننا إذن كتابة معادلة برنولى كالتالى :

$$P_0 + gh_1d = P_0 + \tfrac{1}{2}v_2^2d + gh_2d$$

لأن P_0 = الضغط الجوى = $P_1 \simeq P_2$

باعادة ترتيب حدود هذه المعادلة نحصل على :

نظرية تورشيللى

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

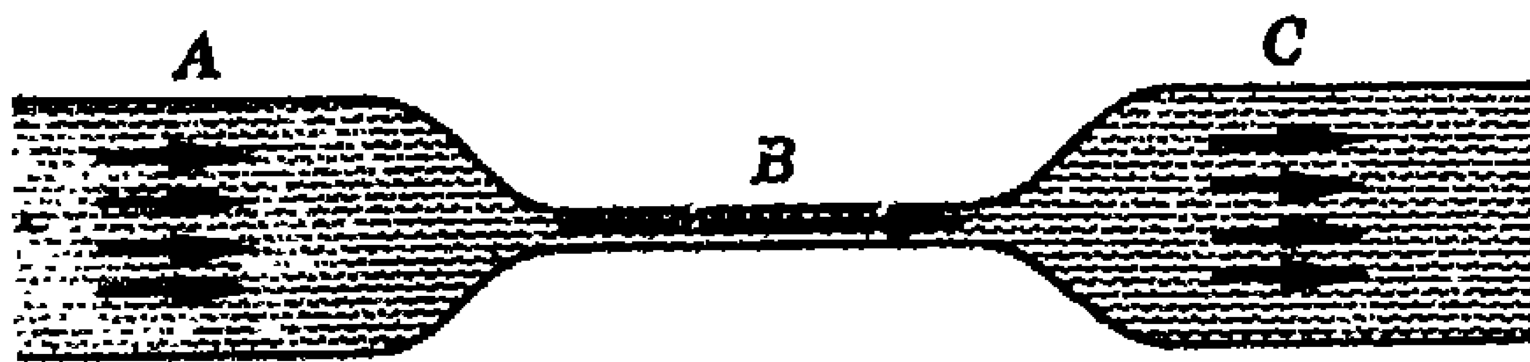
وهذه هى **نظرية توريشللى** . لاحظ أن سرعة تدفق السائل تساوى سرعة كرة تسقط من ارتفاع قدره $h_1 - h_2$ وهذا يوضح حقيقة أنه عندما ينساب قليل من السائل من ذيل الماسورة فإن هذا يحدث كما لو أننا قد أخذنا نفس الكمية من السائل من السطح العلوى للخزان واسقطناها إلى مستوى ذيل الماسورة . وبالطبع يهبط مستوى سطح الخزان بمقدار معين . وتتحول طاقة الوضع المفقودة إلى طاقة الحركة للسائل المتدفق . فإذا وجه ذيل الماسورة إلى أعلى كما فى يسار الشكل ٩ — ٢٥ فإن طاقة الحركة سوف تسمح للسائل بالارتفاع إلى المستوى المبين قبل السقوط . وعمليا تؤدى فواقد طاقة اللزوجة إلى تغيير النتيجة بعض الشيء .

٩ — ١٧ تطبيقات أخرى لمعادلة برنولى

مثال توضيحى ٩ — ١٢ : افترض أن الماء ينساب خلال انبوبة كالمبينة فى الشكل ٩ — ٢٦ . من الواضح أن انسياب الماء عند B أكبر منه عند A أو C . بفرض أن سرعة الانسياب هى 0.20 m/s عند A، 2.0 m/s عند B ، قارن الضغط عند B بالضغط عند A .

طريقة الحل : بتطبيق معادلة برنولى وملاحظة أن متوسط طاقة الوضع ثابت فى هذين المكانين نجد أن :

$$P_A + \tfrac{1}{2}v_A^2d = P_B + \tfrac{1}{2}v_B^2d$$

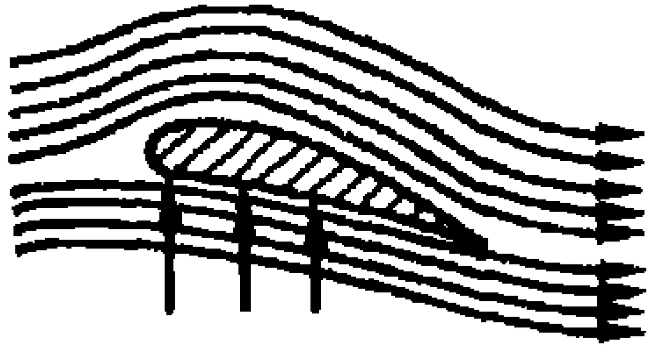


شكل (٩ — ٢٦)
حيث أن سرعة المائع اكبر مايمكن عند B فإن الضغط يكون أقل مايمكن عند هذه النقطة .

وبالتعويض عن $v_A = 0.20$ m/s ، $v_B = 2.0$ m/s ، $d = 1000$ kg/m² نجد أن $P_A - P_B = 1980$ N/m². ومن ثم فإن ضغط المائع فى الاختناق اقل كثيرا منه فى الماسورتين الكبيرتين الموجودتين على جانبيه . وربما كان هذا عكس ماقد يتوقعه المرء أولا . ومع ذلك فإن هذا صحيحا وله تطبيقات واسعة فمثلا يستخدم الشفاط (جهاز لسحب الغاز) فى الحصول على تفريغ جزئى بدفع الماء بشدة خلال اختناق حيث يقل الضغط بدرجة كبيرة .

يمكننا أن نرى بسهولة من الشكل ٩ — ٢٦ أن الضغط عند A يجب أن يكون أكبر من الضغط عند B . فحيث أن كل حجم صغير من المائع يتسارع عندما يتحرك من A إلى B ، اذن لابد أن تؤثر عليه قوة غير متزنة متجهة إلى اليمين . وعليه فإن الضغط يجب أن يقل عند الانتقال من A إلى B . هل يمكنك أن تعكس هذا الخط فى التفكير لإثبات أن الضغط عند C اكبر من الضغط عند B ؟

تعطينا هذه النتيجة — وهى أن السرعة تكون كبيرة عندما يكون الضغط منخفضا . تفسيرا لتلك الحقائق المختلفة كرفع الهواء لجناح الطائرة عند إقلاعها والمسار المنحنى لكرة يقذفها لاعب كرة ماهر . ويوضح الشكل ٩ — ٢٧ انسياب الهواء حول جناح طائرة . ستلاحظ فى هذه الحالة أن الهواء يسير بسرعة أكبر على الجانب العلوى للجناح منه على الجانب الآخر . لهذا يكون الضغط على الجانب العلوى للجناح أقل مما يؤدى إلى دفع الجناح إلى أعلى .



شكل (٩ — ٢٧)
تؤثر على جناح الطائرة قوة متجهة من منطقة السرعة المنخفضة (الضغط العالى) الموجودة تحت الجناح إلى منطقة السرعة العالية (الضغط المنخفض) الموجودة فوق الجناح .

٩ — ١٨ قياس ضغط الدم

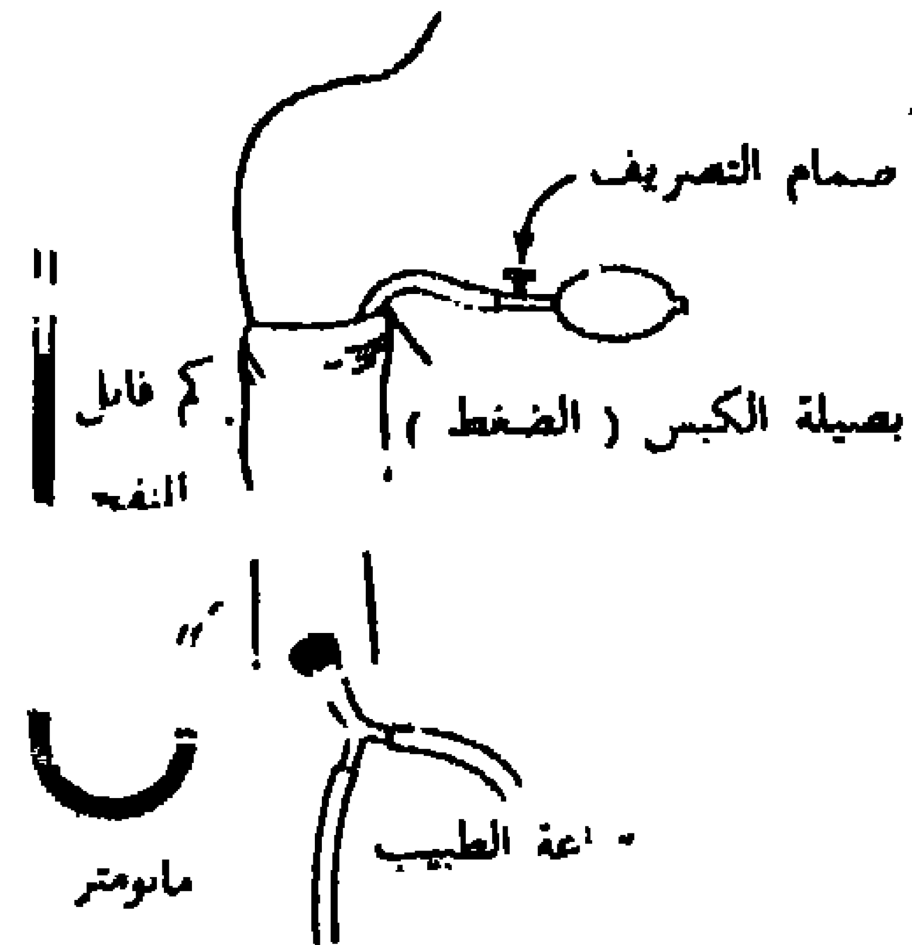
هناك أمثلة كثيرة أخرى لتوضيح أهمية انسياب الموائع . ولكن ماتبقى من هذا الفصل يكفى فقط لمثال واحد آخر وهو قياس ضغط الدم . من المعروف أن ضغط الدم فى شرايينك وأوردتك يتغير تغيرا كبيرا كدالة فى كل من الزمن والموضع فى الجسم . فعندما ينبض القلب يرتفع ضغط الدم عند المخرج وينخفض على التعاقب ، وتنتشر هذه الاختلافات فى الضغط فى كل مكان فى الجهاز الشريانى . ولكن عندما يتدفق الدم فى الأوعية الصغيرة فالأصغر ، فإن ظواهر الاحتكاك ومرونة الأوعية ذاتها قد تؤدى إلى تغيير نمط السريان تماما . وفى النهاية ، عندما ينساب الدم فى الأوردة فى رحلة العودة إلى القلب يكون الانسياب منتظما تقريبا .

وتعتبر التغيرات الكبيرة فى ضغط الدم فى الشرايين ذات أهمية كبيرة فى كثير من الوجوه . وبالرغم من ذلك فإننا سنذكر هنا وجهين فقط لذلك : (١) قد تؤدى النهايات العظمى العالية لضغط الدم إلى تمزق جدران الأوعية التى ينساب فيها الدم ، وتعتبر الضربات الشديدة التى تسبب ازرقاق لون الجلد مثالا لهذا التمزق . (٢) تعطى قمم وقيعان الضغط أثناء دورة نبض القلب معلومات عن اختناقات الأوعية الدموية وعن عوامل أخرى تؤثر على الدورة الدموية .

تعطى بيانات ضغط الدم العادية رقمين يمثل أحدهما الضغط الانقباضى للقلب، ويمثل الآخر الضغط الانبساطى له . وهذان الرقمان هما قراءتا الضغط (بالمليمترات من الزئبق عادة) عند قمة دورة انسياب الدم الضغط الانقباضى) ونقطتها المنخفضة (الضغط الانبساطى) . وتستخدم رتيبة الموضحة فى الشكل ٩ — ٢٩ لقياس هاتين القيمتين .

يوضع لفافة أو كم قابل للنفخ حول العضد على نفس مستوى القلب ، ثم يراقب الضغط الذى يؤثر به الكم الملفوف على الذراع عند نفخها باستخدام مانومتر زئبقى . وعند دفع الهواء فى الكم حتى يزيد ضغطه عن ذروة الضغط فى شريان الذراع . يتوقف نتيجة لذلك سريان الدم فى أسفل الذراع . فإذا وضع شخص سماعة طبيب (مسماع) على الشريان قبل الكم فلن يسمع أى صوت لأن الدم لاينساب فى الشريان .

يقلل الضغط بعد ذلك فى الكم تدريجيا بالسماح للهواء أن يتسرب منه . وفجأة يبدأ الشخص فى سماع نبض فى سماعة الطبيب عند ضغط معين يسمى الضغط الانقباضى . وعند هذه النقطة يكون الضغط فى الكم منخفضا بدرجة تسمح للدم بالتدفق عبر الكم تحت قيمة الضغط . وتعطى قيمة ضغط الهواء فى الكم حينئذ ضغط الدم عند ذروة دورة نبض القلب ، وينشأ الصوت الذى يسمعه الشخص فى الحقيقة نتيجة للتدفق المضطرب للدم عبر اختناق الشريان تحت الكم .



شكل (٩ — ٢٨)
الجهاز المستخدم لقياس ضغط الدم .

وعندما يقلل الضغط فى الكم أكثر من ذلك يصبح سريان الدم أقل اضطرابا وتلتقط سماعة الطبيب هذه الحقيقة كتغير فى حدة الصوت . وفى النهاية يتوقف الصوت تماما . وعند هذا الضغط ، وهو الضغط الانبساطى ، يستطيع الدم أن ينساب عبر الكم فى كل أجزاء الدورة . إذن تمثل هذه القراءة أقل ضغط فى دورة النبض . والضغط الانقباضى والانبساطى فى الإنسان الشاب العادى هما حوالى

80 mm Hg, 120 mm Hg على الترتيب (ويكتبان عادة على الصورة 120/80) . ولكن هذان الضغطان يتغيران عادة مع تقدم الانسان فى السن . وبالرغم من ذلك فإن الضغوط الانقباضية العالية جدا (200 mm Hg مثلا) تكون دائما تقريبا سببا للقلق الشديد . أما التغيرات الأخرى فى الضغط فإنها تحتاج عادة إلى بحث دقيق قبل التعامل معها .

ملخص

تنقسم المواد إلى مجموعتين ، الموائع والجوامد . هناك نوعان من الموائع هما بالتحديد السوائل والغازات . يمكن تقسيم الجوامد إلى بلورية وغير بلورية . هناك أمثلة للخطوط الفاصلة فى جميع هذه التصنيفات . فالزجاج مثلا يمكن أن يصنف كجوامد أو سوائل لزجة جدا .

الكثافة الكتلية d لمادة هى كتلة وحدة الحجوم من المادة : $d = m/V$. الكثافة الوزنية لمادة هى وزن وحدة الحجوم : $D = W/V$. زيادة درجة الحرارة تسبب نقص كثافة معظم المواد . ومع ذلك فإن الماء فى مدى درجات الحرارة من 9°C إلى 4°C يعتبر استثناءاً من هذه القاعدة . يعرف الوزن النوعى بأنه النسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء . تتغير هذه النسبة مع درجة الحرارة .

ينطابق قانون هوك على كثير من المواقف التى يكون فيها التشوه مرنا . ينص هذا القانون على أن التشوه يتناسب مع القوة المشوهة . اذا زاد التشوه عن حد المرونة لايعود النظام ثانية إلى حالته قبل التشوه بعد إزالة القوة المشوهة . يمكن صياغة قانون هوك بدلالة الإجهاد والانفعال كالتالى : « الإجهاد يتناسب مع الانفعال » .

من التعريف ، معامل المرونة هو النسبة بين الإجهاد والانفعال . فى حالة تشوه الشد يسمى المعامل معامل يونج . يستخدم معامل القص فى حالة التشوه القصى . عندما يحدث التشوه نتيجة لضغط متساو على جميع الأوجه ، تسمى النسبة بين الضغط والكمية $\Delta V/V$ معامل الحجم . مقلوب معامل الحجم يسم الانضغاطية الحجمية .

زيادة الضغط نتيجة لسائل ارتفاعه h وكثافته الكتلية d يعطى بالعلاقة $\Delta P = hdg$، الضغط عند أى نقطة فى مائع متساو فى جميع الاتجاهات . علاوة على ذلك ، اذا عرض سائل محبوس فى وعاء ضغط فإن هذا الضغط ينتقل إلى كل نقطة فى السائل . هذه القاعدة تسمى قاعدة باسكال ، وهى أساس عمل المكبس الايدرولى .

تنص قاعدة ارشميدس على أنه «إذا غمر جسم جزئيا أو كليا فى مائع فإنه يدفع إلى أعلى بقوة تساوى وزن السائل الذى يزيحه الجسم» يمكن إيجاد حجم جسم ما باستخدام هذه القاعدة بوزن الجسم عندما يكون مغمورا فى سائل معلوم الكثافة .

يمكن قياس ضغط الجو باستخدام البارومتر ، ويمكن قياس الفروق فى الضغط باستخدام المانومتر . الضغط الجوى العيارى هو 1.013×10^5 N/m² وهو يساوى 14.7 lb/in² و 76 cm Hg .

فى الانسياب الطبقى ينساب المائع على طول خطوط معينة تسمى الخطوط الانسيابية. عند حدوث الدفق المضطرب توجد مناطق لايتبع فيها المائع الخطوط الانسيابية .

اللزوجة مقياس للقوة اللازمة لحدوث انسياب من النوع القصى فى السائل ويرمز لها بالرمز η ووحداتها فى النظام SI هى النيوتن – ثانية لكل متر مربع . وحدات اللزوجة فى النظام cgs هى البويز (P) ، حيث 10P = 1 N.s/m² . يعطى معدل الدفق لسائل لزج فى أنبوبة اسطوانية بقانون بوازيل . يمكن مقارنة لزوجة السوائل بقياس معدل الدفق فى نفس الأنبوبة . عند اتخاذ الاحتياطات اللازمة يتناسب معدل الدفق عكسيا مع اللزوجة .

تصف معادلة برنولى انسياب الموائع التى تكون تأثيرات اللزوجة فيها مهملة ويمكن استخدامها للحصول على نظرية توريشللى وشرح عمل الشفاطات والمراذيز والأجهزة المشابهة .

للحصول على ضغط الدم يجب قياس قيمتين له . أعلى ضغط في دورة نبض القلب هو الضغط الانقباضى ، وأقل ضغط هو الضغط الانبساطى . الضغط الانقباضى والضغط الانبساطى العاديان للإنسان الشاب هما 120 mm Hg ، 80 mm Hg على الترتيب .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – وضع كل مادة من مجموعة المواد المعروفة فى الصنف (أو الأصناف) المناسبة : غاز ، سائل ، جامد ، مائع ، جامد بلورى ، جامد غير متبلور ، زجاج . ذكر خصائص كل صنف .

٢ – تعريف الكثافة الوزنية والكثافة الكتلية . حساب كل منهما لمادة عند معرفة البيانات اللازمة . استخدام الكثافة لحساب حجم كتلة معينة أو وزن معين من المادة . ذكر العلاقة بين d و D .

٣ – رسم شكل تخطيطى للعلاقة البيانية بين الاستطالة والقوة لمادة تتبع قانون هوك . ذكر معنى (تعريف) الإجهاد والانفعال فى حالة تشوه الشد والتشوه القصى والتشوه الحجمى . تعريف المعامل فى كل حالة . كتابة قانون هوك بدلالة الإجهاد والانفعال .

٤ – كتابة العلاقة بين الانضغاطية الحجمية ومعامل الحجم وذكر الوحدات المناسبة لكل منها .

٥ – شرح لماذا تنهار العلبة المبينة فى الشكل ٩ – ١٠ عندما تفرغها المضخة من الهواء .

٦ – إيجاد ضغط عمود من مائع معلوم الكثافة . شرح كيفية استخدام مانومتر لقياس فروق الضغط . شرح مبدأ عمل البارومتر الزئبقى . إيجاد القوة الناتجة من مائع على مساحة معينة تقع على عمق معلوم فيه .

٧ – ذكر نظرية باسكال وشرح كيفية استخدامها فى الكبس الايدرولى .

٨ – ذكر قاعدة ارشميدس واستخدامها لإيجاد قوة الطفو التى تؤثر على جسم معلوم الحجم مغمور فى مائع معلوم الكثافة .

٩ – استخدام قاعدة ارشميدس لحساب كثافة مادة بتعيين حجمها عن طريق غمرها فى مائع معلوم الكثافة .

١٠ – كتابة قيمة الضغط الجوى العيارى بالنيوتن لكل متر مربع والباوند لكل بوصة مربعة والسنتيمترات من الزئبق .

١١ – شرح معنى الانسياب الطبقى والخطوط الانسيابية والدفق المضطرب .

١٢ – ترتيب مجموعة من المواد ترتيبا تصاعديا بالنسبة للزوجتها . شرح معنى اللزوجة وكيف ترتبط بفواقد الطاقة الاحتكاكية . ذكر الوحدات الشائعة التى تقاس بها اللزوجة .

١٣ – تعريف كل كمية فى قانون بوازيل واستخدامه فى الحسابات البسيطة .

١٤ – تعريف كل كمية فى معادلة برنولى واستخدامها فى الحسابات البسيطة . اشتقاق نظرية تروريشلى منه . واستخدام برنولى لإثبات أن الضغط يقل مع زيادة معدل الدفق .

١٥ – شرح مايفعله الطبيب أو الطبيبة عند قياس ضغط الدم .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الغازات ، السوائل ، الجوامد

الموائع

الجامد المتبلور مقابل الجامد غير المتبلور

الكثافتين الوزنية والحجمية

قانون هوك

الجسم المرن ، حد المرونة

الإجهاد والانفعال والمعامل

معامل الشد ومعامل القص ومعامل الحجم

المطاوعة ، الانضغاطية الحجمية

$\Delta P = hdg$

قاعدة ارشميدس ، القوة المعومة

البارومتر والمانومتر

الضغط الجوى العيارى

الخطوط الانسيابية ، الانسياب الطبقى

الدفق المضطرب

اللزوجة ، وحدة البويز

قانون بوازيل

معادلة برنولى

السرعة العالية تدل ضمنا على الضغط المنخفض

الضغط الانقباضى والضغط الانبساطى

اسئلة وتخمينات

١ - افترض أن لديك مكعبا مصمتا من المعدن . كيف يمكنك تعيين كثافته ؟

٢ - كيف يمكنك تعيين كثافة الزجاج المصنوع منه كرات زجاجية صغيرة ؟ افترض أن الكرات اصغر من أن توزن أو تقاس باستخدام الأجهزة المتاحة . افترض مع ذلك أن لديك كمية وفيرة من المادة .

٣ - كيف يمكنك أن تعين كثافة سائل وكثافة غاز ؟

٤ - قارن الضغط على عمق 5.0 m فى بحيرة صغيرة بالضغط على عمق 5.0 m تحت سطح بحيرة كبيرة . كيف تعتمد القوة التى يجب أن يتحملها سد على عمق البحيرة المقام عليها هذا السد ؟

٥ - اشرح لماذا « يبحث الماء عن مستواه الخاص » ؟

٦ - كيف يمكنك قياس معامل القص لقطعة من الحلوى الجيلاتينية ؟ لماذا يجب ان يعتمد المعامل على ماإذا كان الجيلاتين يحتوى على قطع من الفاكهة أم لا ؟ تحتوى اللدائن المقواة كالزجاج الليفى على ألياف زجاجية بداخل اللدن . ماهو تأثير الألياف الزجاجية على الخواص الميكانيكية للدائن ؟ (العظم مقوى بألياف الكولا جين بنفس الطريقة ، لهذا فإن معامل الشد ومقاومة الشد للعظم أكبر مما لو كانت هذه الألياف غير موجودة) .

٧ - تقل لزوجة جميع السوائل تقريبا مع درجة الحرارة . وكما سنرى فى الفصل التالى تزداد طاقة حركة الجزيئات فى السائل مع زيادة درجة الحرارة . كيف يمكن استخدام هذه الحقيقة فى تبرير تغير اللزوجة مع درجة الحرارة ؟

٨ - تتكون بلازما الدم من الدم الذى أزيلت منه الصفائح الدموية والمواد ، الدموية الأخرى . ولزوجة الدم ككل هى 4 cP تقريبا ، بينما لزوجة بلازما الدم هى حوالى 1.5 cP . اشرح سبب هذا الاختلاف ؟

٩ - وضعت كأس زجاجية مملوءة إلى حافتها بالماء على ميزان ، ثم وضع قالب من الخشب برفق فى الماء بحيث طفا فى الكأس ، عندئذ طفح بعض الماء ونشف بقطعة من القماش وفى النهاية ظلت الكأس مملوءة إلى حافتها . قارن قراءتى الميزان الابتدائية والنهائية .

١٠ - اشرح كيف يمكنك تعيين كثافة جسم غير منتظم الشكل باستخدام قاعدة ارشميدس : أولا : إذا كانت مادة الجسم أكبر كثافة من السائل المستخدم ، ثانيا : إذا كانت مادة الجسم أقل كثافة من السائل المستخدم .

١١ - قدر كثافة جسمك بالاستعانة بخبرتك الخاصة فى الطفو . (ق)

١٢ - اشرح مبدأ عمل السيفون .

١٣ - لكى تسير كرة البيسبول فى مسار منحن يضع اللاعب « تدويما » عليها . اشرح لماذا يجب أن تتبع الكرة المدومة مسار منحنيا .

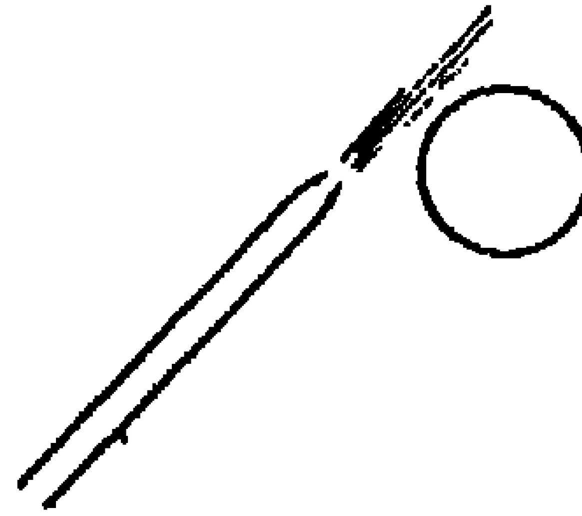
١٤ - يمكن أن تتعلق كرة البنج بونج فى الهواء بنفخ تيار مندفع من الهواء فوقها مباشرة كما هو موضح فى الشكل م ٩ - ١ . اشرح .

١٥ - ناقش معنى معادلة برنولى عندما لايكون السائل منسابا .

مســـائل

١ - كرة من الصلب نصف قطرها 0.50 cm وكتلتها 4.15 g . اوجد الكثافة الكتلية للصلب .

٢ - علبة وزنها 3.1 lb عندما تكون فارغة ووزنها 46.2 lb عندما تكون مملوءة بالماء . ماهو حجم العلبة ؟



شكل (م٩ - ١)

٣ - كثافة الجسم البشرى قريبة من كثافة الماء . إوجد الحجم الذى يشغله شخص كتلته 70 kg .

٤ - البكنومتر هو قارورة صغيرة تستخدم لتعيين كثافة السوائل . فى حالة معينة كان « وزن » البكنومتر فارغا 20.00 g وكان « وزنه » مملوءا بالماء 22.00 g عند 20°C . أفرغ البكنومتر وجفف ثم أعيد ملئه بمحلول بنزينى فكان « وزنه » 21.76 g . باستخدام هذه القياسات ومعلومية كثافة الماء اوجد حجم القارورة وكثافة المحلول البنزينى . فى جميع القياسات الدقيقة للكثافة يجب أن يؤخذ وزن الهواء الموجود فى القارورة الفارغة فى الاعتبار . ماهو « وزن » الهواء فى البكنومتر الموصوف فى هذه المسألة (كثافة الهواء تساوى $0.00129\ g/cm^3$) .

٥ - علق جسم كتلته 5.0 kg فى طرف سلك من الصلب قطره 0.70 mm وطوله 1.4 m . مامقدار استطالة السلك تحت تأثير هذا الحمل ؟

٦ - مسك طوق مقطوع من المطاط من أحد طرفيه وعلق حمل صغير فى الطرف الآخر لكى يظل الطوق مشدودا . وكان طول الطوق 9.0 in ومساحة مقطعه $7.8\times10^{-3} m^2$. وعندما أضيف حمل قدره 2.0 lb إلى طرفه استطال الطوق المطاطى بمقدار 0.27 in . اوجد متوسط معامل يونج فى هذا المدى بالباوند لكل بوصة مربعة .

٧ - إشارة مرور ضوئية كتلتها 80 lb معلقة فوق منتصف طريق بواسطة حبلين من الصلب متساويين فى الطول مربوطين فى قائمين على جانبى الطريق . فإذا كان كل من الحبلين يصنع زاوية قدرها 20° مع الأفقى ، فما هى الاستطالة النسبية للحبلين تحت تأثير وزن الإشارة الضوئية ؟ افترض ان مساحة مقطع كل من الحبلين $0.03\ in^2$.

٨ - استخدم حبل من النحاس مساحة مقطعه $0.0030\ cm^2$ فى رفع جسم كتلته 100 g . بأى تسارع يجب أن نرفع الجسم إذا كانت استطالة السلك لايجب أن تزيد عن 0.10% ؟

٩ - اثبت أن الزيادة الجزئية فى طول سلك يتكون من طول قدره L_1 من السلك 1 متصل بطول قدره L_2 من السلك 2 تحت تأثير حمل تعطى بالكمية :

$$\left(\frac{F}{\pi a^2 Y_1 Y_2}\right)\left(\frac{L_1 Y_2 + L_2 Y_1}{L_1 + L_2}\right)$$

علما بأن السلكين لهما نفس نصف القطر a .

١٠ - قالب من الجيلاتين بعدا سطحه العلوى 4.0 cm × 4.0 cm وارتفاعه 3.0 cm . طبقت على سطحه العلوى قوة قصية مقدارها 0.50 N فتسببت فى ازاحته مسافة قدرها 2.5 mm فى اتجاه القوة . اوجد معامل القص للجيلاتين بالنيوتن لكل متر مربع .

١١ – (أ) بأى نسبة بالتقريب سوف يتغير حجم قضيب من الصلب إذا وضع القضيب فى غرفة تفريغ ثم فرغت الغرفة من الهواء؟ (ب) ماقيمة الزيادة فى الضغط اللازمة لكى يقل حجم من البنزين بمقدار 1% ؟

١٢ – ماهو متوسط الضغط الذى تؤثر به الارضية على قدم سيدة كتلتها 70 kg عندما تقف على رؤوس اصابع قدم واحدة ؟ افترض ان مساحة التلامس بين القدم والأرضية هى $12\ cm^2$.

١٣ – الضغط الجوى العيارى هو $1.013 \times 10^5\ N/m^2$ اوجد القوة التى يؤثر بها الجو على جانب علبة مساحتها $600\ cm^2$. عبر عن إجابتك بالنيوتن والباوند .

١٤ – ماهو ضغط الماء على عمق 15.0 m فى بحيرة عذبة ؟ ماهو الضغط الكلى عند ذلك البعد بفرض أن الضغط الجوى $1.00 \times 10^5\ N/m^2$ ؟

١٥ – الضغط الجوى العيارى هو $1.013 \times 10^5\ N/m^2$ ($14.7\ lb/in^2$) ماهو طول عمود الماء الذى يستطيع هذا الضغط أن يحمله ؟ (ب) ماهو أقصى ارتفاع يمكن عنده رفع الماء من بئر باستخدام مضخة ماء من النوع التفريغى إذا كان ضغط الجو هو الضغط الجوى العيارى ؟

١٦ – شفط شخص فتحة أحد فرعى مانومتر زئبقى فاستطاع أن يجعل سطح الزئبق فيه مرتفع عن سطح الزئبق فى الفرع الآخر بمقدار 74 mm (لايوصى بإجراء ذلك لأن بخار الزئبق سام) . ماهو ضغط الهواء فى فم هذاالشخص عند إجراء هذه التجربة إذا كان الضغط الجوى $1.013 \times 10^5\ N/m^2$ ؟ عبر عن إجابتك بالسنتيمترات من الزئبق والنيوتن لكل متر مربع .

١٧ – أنبوبة على شكل الحرف U (تشبه المانومتر المبين فى شكل ٩ – ١٩ إلى درجة كبيرة) تحتوى على الماء فى أحد فرعيها والزيت فى الفرع الآخر . وقد وجد أن عمودا من الزيت ارتفاعه 62 cm فى أحد الفرعين يتزن مع عمود من الماء ارتفاعه 54 cm فى الفرع الآخر . ماهى كثافة الزيت ؟

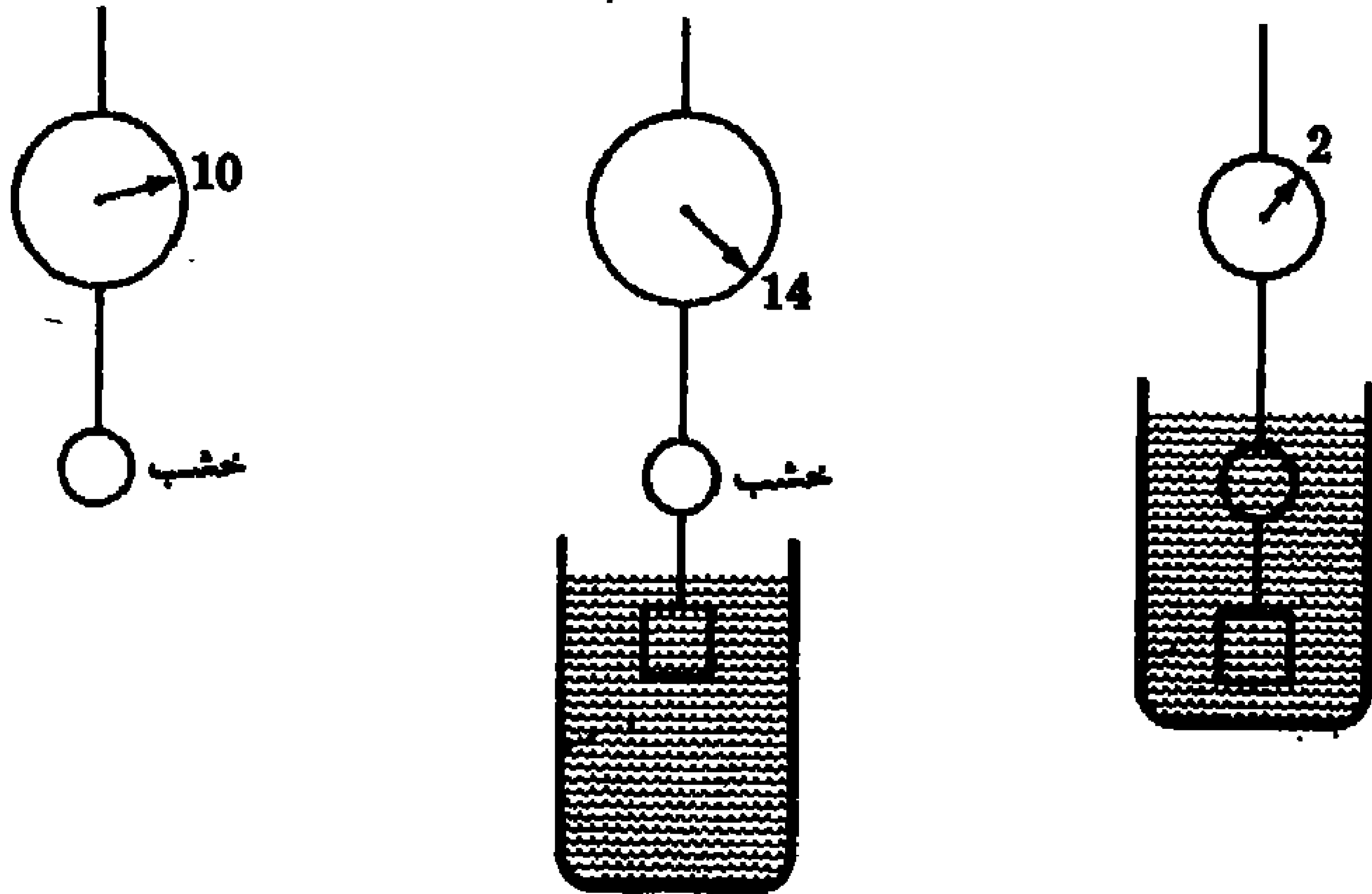
١٨ – تؤثر مكنة التشغيل بالكبس على اللوح المعدنى بقوة هائلة لتحوله إلى الشكل المطلوب . افترض أن ضغط الدخل هو $150\ lb/in^2$ وأنه يطبق على كباس قطره 0.5 in . وتؤثر قوة خرج المكبس الايدرولى على كباس قطره 1.3 ft . ماهى القوة التى يؤثر بها المكبس على اللوح المراد تشكيله ؟

١٩ – يطفو رجل على الماء بحيث يكون 95% من حجمه تحت سطح الماء . ماهى الكثافة الكتلية له ؟

٢٠ – تزن قطعة من المعدن غير منتظمة الشكل 10.00 g فى الهواء و 8.00 g عندما تكون مغمورة فى الماء . اوجد حجم المعدن وكثافته .

٢١ – « تزن » القطعة المعدنية المذكورة فى المسألة السابقة 8.50 g عندما تكون مغمورة فى زيت معين . اوجد كثافة الزيت .

٢٢ – « تزن » قطعة من الخشب 10.00 g فى الهواء . وعندما علقت قطعة ثقيلة من المعدن أسفلها ، وكان المعدن مغمورا فى الماء ، وجد أن «وزن» الخشب فى الهواء بالاضافة إلى وزن المعدن فى الماء هو 14.00 g . ثم غمر الخشب والمعدن سويا فى الماء فوجد أن «وزنهما» الإجمالى فى الماء هو 2.00 g . اوجد حجم وكثافة الخشب (أنظر الشكل م ٩ – ٢) .



شكل (م٩ – ٢)

٢٣ – «تزن» كأس مملوءة جزئيا بالماء 20.00 g . فإذا وضعت قطعة من الخشب كثافتها $0.800\ g/cm^3$ وحجمها $2.0\ cm^3$ طافية على سطح الماء فى الكأس ، فما هو « وزن » الكأس فى هذه الحالة ؟

٢٤ – «تزن» كأس مملوءة جزئيا بالماء 20.00 g . علقت قطعة من المعدن كثافتها $3.00\ g/cm^3$ وحجمها $1.5\ cm^3$ فى خيط رفيع وغمرت فى الماء بحيث لاتستقر على قاع الكأس ، ماهو «وزن» الكأس فى هذه الحالة ؟

٢٥ – كثافة الثلج $0.917\ g/cm^3$ والكثافة التقريبية لماء البحر الذى يطفو فيه الثلج $1.025\ g/cm^3$. ماهى النسبة بين حجم الجزء المغمور من جبل الثلج تحت سطح الماء وحجمه الكلى ؟

٢٦ – ماهو أصغر حجم لقالب من المادة ($D = 50\ lb/ft^3$) يمكن أن تحمل رجلا وزنه 160 lb كلية فوق سطح الماء عندما يقف عليه .

٢٧ – قالب من مادة كثافتها d_1 يطفو على سائل مجهول الكثافة بحيث ينغمر ثلاثة أرباع حجمه فيه . اثبت أن كثافة السائل المجهول هى $d_2 = 1.33\ d_1$.

٢٨ – طبقا للنظرية التى استنبطها ستوكس لأول مرة تعطى القوة اللازمة لجذب كرة نصف قطرها a بسرعة قدرها v فى مائع لزوجته η بالمعادلة التالية (المعروفة بقانون ستوكس) :

$$F = 6\pi\eta a v$$

ماقيمة القوة اللازمة لجذب بلية نصف قطرها 1.50 cm فى الماء بسرعة قدرها 20 cm/s ؟

٢٩ – أسقطت كرة زجاجية صغيرة نصف قطرها 0.50 mm وكثافة مادتها $2600\ kg/m^3$ فى حوض زيت ($d = 950\ kg/m^3,\ \eta = 2.1\ P$) اوجد (أ) قوة الطفو المؤثرة على الكرة ، (ب) قوة الجذب المؤثرة على الكرة . (جـ) ثم استخدم قانون ستوكس (انظر المسألة ٢٨) لإيجاد السرعة النهائية للكرة عند سقوطها فى الزيت .

٣٠ – يعين حجم الجسيمات الكروية الدقيقة عادة بقياس سرعة ترسيبها . اثبت أنه إذا كان جسيم كثافته d يصل إلى سرعة نهائية قدرها v عند السقوط فى مائع كثافته d_f ولزوجته η فإن نصف قطره يعطى b بالعلاقة :

$$b = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g(d - d_f)}}$$

استخدم قانون ستوكس (انظر المسألة ٢٨) .

٣١ – يتسرب الماء من ماسورة قريبة من قاع خزان ضخم لتخزين الماء على هيئة تيار من الماء مندفع منها . فإذا كان سطح الماء فى الخزان يقع على ارتفاع 50 ft من نقطة التسرب ، (أ) بأى سرعة يندفع الماء من الفتحة ؟ (ب) إذا كانت مساحة الفتحة $0.010\ in^2$ فما هى كمية الماء المتدفقة منه فى 1s ؟

٣٢ – ينساب الماء بهدوء فى داخل نظام مغلق من المواسير . وكانت سرعة الماء فى إحدى النقط 3.0 ft/s ، بينما كانت سرعته 4.0 ft/s فى نقطة اخرى تقع على ارتفاع 10 ft من النقطة الأولى . فاذا كان الضغط عند النقطة $12\ lb/in^2$ ، (أ) ماقيمة الضغط عند النقطة العليا ؟ (ب) ماهو الضغط عند النقطة العليا إذا كان الماء يتوقف عن الجريان عندما يكون الضغط عند النقطة السفلى 10 lb/in ؟

٣٣ – إبرة تحت جلدية (للحقن تحت الجلد) نصف قطرها 0.40 mm وطولها 5.0 cm مركبة فى محقن مساحة سطح مكبسه $3.0\ cm^2$ ماهى القوة التى يجب أن تؤثر على المكبس بحيث يتدفق الماء من الإبرة بمعدل قدره $0.20\ cm^3/s$ ؟ افترض أن الإبرة تدفع الماء فى الهواء .

٣٤ – يعين الحد الفاصل بين الانسياب الطبقى والدفق المضطرب باستخدام عدد يسمى عدد رينولدز ، ويعطى هذا العدد بالعلاقة :

$$\text{عدد رينولدز} = \frac{Qd}{\pi r \eta}$$

حيث Q معدل دفق مائع كثافته d ولزوجته η فى أنبوبة أسطوانية نصف قطرها r . ويبدأ ظهور الدفق المضطرب إذا زاد عدد رينولدز عن حوالى 1000 . إوجد بالتقريب أقصى معدل للدفق فى حالة الانسياب الطبقى للبنزين فى أنبوبة قطرها 0.50 cm . عبر عن إجابتك بالسنتيمترات المكعبة فى الثانية وافترض أن القيمة الحرجة لعدد رينولدز هى 1000 .

الفصـــــل العاشـــر

درجة الحرارة والحركة وقانون الغاز

نبدأ بهذا الفصل دراسة الطاقة الحرارية وتأثيراتها . وسنقدم تعريف درجة الحرارة ونناقش طبيعة الحرارة . وبعد تناول قانون الغاز سيكون فى مقدورنا أن نستنتج أن درجة الحرارة تكون مقياساً لطاقة حركة الجزيئات وأن الطاقة الحرارية هى طاقة الحركة الجزيئية العشوائية للغاز . وسنحتاج لهذه المفاهيم كأساس للفصل التالى المخصص لدراسة الخواص الحرارية للمواد وتكافؤ الحرارة والصور الأخرى للطاقة .

١٠ – ١ الآراء السابقة عن كنه الحرارة

ظلت طبيعة الحرارة مصدر اهتمام الإنسان منذ أن اكتشف النار فى قديم الزمن . ونحن نعلم الآن أن الخواص العجيبة للنار قد جعلت الإنسان القديم يؤلهها . وبالرغم من أن النضج الروحى للجزء الأعظم من الجنس البشرى قد وصل إلى مستوى لم تعد معه النار تعتبر إلاها ، إلا أن الشعور بأن الحرارة والنار صفات ذات معنى روحى غير بادية للحواس أو مدركة بالعقل قد استمر إلى وقت قريب نسبيا .

وفى القرن الثامن عشر كان الناس يعتقدون أن الحرارة التى تدفىء أجسامهم عند وقوفهم بالقرب من النار هى كمية مادية تنساب إليهم فى الفراغ . وقد سمى هذا المائع **كالوريك** . وعند تبريد قطعة من المعدن الساخن بالماء كان يعتقد أن السيال الحرارى – كالوريك – ينساب من المعدن إلى الماء . وعندما ينتزع اللهب قطعة من الخشب المشتعلة يتحرر السيال الحرارى – كالوريك – وينساب إلى الأجسام الأخرى ، أو هكذا كان الناس يظنون فى الثمانينات من القرن الثامن عشر . وكل قطعة من المادة – حسب الاعتقاد السائد فى ذلك الوقت – تحتوى على كمية أكبر أو أقل من الحرارة حسب حرارتها .

ولم يواجه مفهوم السيال الحرارى السائد أى تحد مؤثر إلا فى التسعينات من القرن الثامن عشر . وكان بنيامين طومسون (الذى منح لقب كونت رمفورد) هو الذى سدد الضربة القاضية لنظرية الكالوريك . كان رمفورد أمريكيا التحق بالقوات البريطانية أثناء الثورة الأمريكية ، وأصبح خبيرا للأسلحة وخدم كموظف رسمى فى حكومة بافاريا لسنوات طويلة . وفى ذلك الوقت قام رمفورد بإجراء عدد من التجارب العلمية فى ورشة للمدافع فى دار صناعة الأسلحة الحربية بميونخ .

لاحظ رمفورد تولد كمية كبيرة من الحرارة أثناء ثقب مواسير المدافع . وحيث أن الشظايا المعدنية المقطوعة بالمثقاب قد فقدت الكالوريك ، أى الحرارة المنطلقة فى عملية الثقب ، فإن الشظايا يجب أن تختلف عن المعدن الأصلى الذى لم يفقد الكالوريك . وبالرغم من ذلك فإن رمفورد لم يستطع إيجاد أى فرق بين الشظايا والمعدن الأصلى فى قدرتها على الاحتفاظ بالحرارة أو إطلاقها . وفى محاولة لدراسة هذه الظاهرة ببعض التفصيل جرب رمفورد مثقابا كليلا (غير حاد الطرف) جدا لا يستطيع قطع المعدن . وبالرغم من عدم قطع أى جزء من المعدن وجد أن المثقاب يولد الحرارة أيضا أثناء دورانه وحكه فى المعدن . وفى الحقيقة كان المثقاب يولد كمية من الحرارة كافية لغليان كمية من الماء موجودة فى تجويف بالمعدن . ومهما تكرر استخدام المثقاب بالطريقة السابق وصفها فإن الحرارة كانت تتولد بسهولة فى كل مرة يعاد استخدام المثقاب فيها من جديد . من هذا استنتج رمفورد أن مصدر الحرارة لاينفذ .

وبالإضافة إلى ذلك استنتج أن الحرارة لا تأتى من المعدن ، ولكن من دوران المثقاب . نتيجة لذلك نبذ رمفورد مفهوم الكالوريك تماما فى عام ١٧٩٨ . وبدلا من ذلك افترض أن حركة المثقاب تنقل الحركة إلى جزيئات المعدن وأن الحرارة هي هذه الحركة بالفعل . وطالما استمر المثقاب فى نقل الحركة إلى المعدن بواسطة قوى الاحتكاك فإن الحركة والحرارة تستمر فى الزيادة فى داخل المعدن . وهذه هى أساسا الصورة التى يقبلها العلماء اليوم عن الحرارة . وسوف نعود إلى مناقشة طبيعة الحرارة مرة أخرى بعد أن نتعرف على مفهوم درجة الحرارة أولا .

١٠ – ٢ الترمومترات

وجدت الوسائل العلمية لقياس مدى سخونة الاجسام قبل اكتشاف رمفورد بزمن طويل . ونحن نعلم كيفيا ماذا يعنى بكلمة ساخن أو بارد . ونعلم ايضا أنه إذا وضع جسم ساخن ملامسا لجسم بارد فإن الجسم الساخن سوف يبرد بينما يسخن الجسم البارد . ولقياس سخونة جسم ما يجب إيجاد طريقة للتعبير عن هذه الخاصية للجسم برقم معين ، وسوف نسمى هذا الرقم درجة حرارة الجسم . وهناك طرق كثيرة لربط خاصية السخونة برقم معين ، ولكن أربعا منها فقط قد لاقت قبولا واسعا .



شكل (١٠ – ١)
عند تسخين الزئبق الموجود فى البصيلة الزجاجية فإنه يتمدد ويرتفع فى الأنبوبة الشعرية . ويعتبر الارتفاع الذى يصل إليه الزئبق فى الأنبوبة الشعرية مقياسا لدرجة الحرارة .

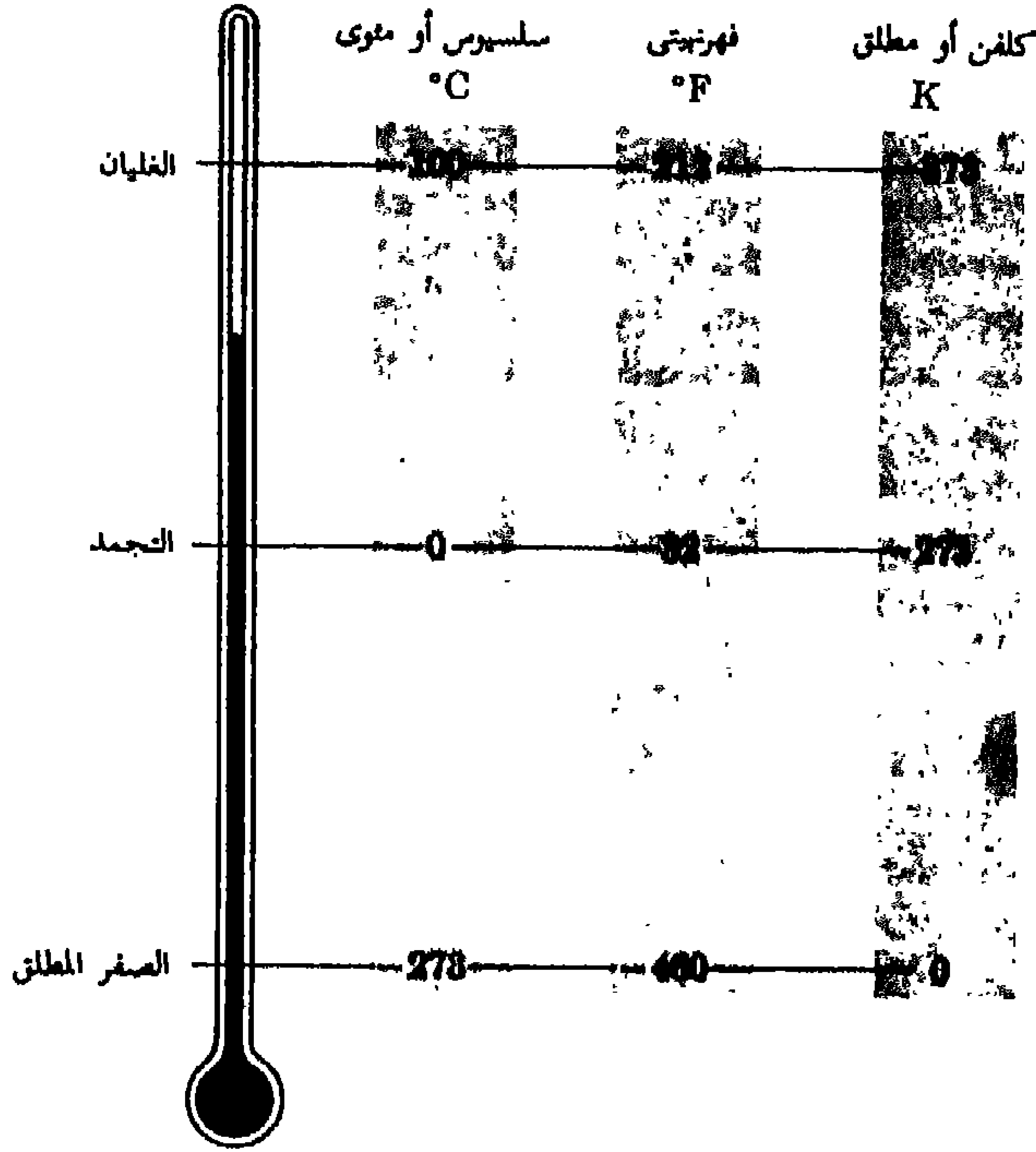
تبنى جميع الترمومترات تقريبا على أساس أن معظم السوائل والجوامد تتمدد عند تسخينها ، وهو ماسوف نناقشه باستفاضة مؤخرا فى هذا الفصل . إذا ملئت بصيلة بسائل كالزئبق ووصلت بأنبوبة شعرية منتظمة كما هو مبين فى الشكل ١٠ – ١ ، فإن هذا الجهاز يمكن استخدامه كترمومتر . فإذا سخن الجهاز فإن الزئبق يتمدد ويرتفع فى الأنبوبة الشعرية . ومن ثم فإن ارتفاع الزئبق يكون مقياساً لسخونة ، أو درجة حرارة الجهاز .

ولكى نضع قيمة عددية على كل مستوى للسخونة يجب أن نعرف مقياسا لدرجات الحرارة ، وهذا ما تم إنجازه بالفعل بطرق مختلفة فى خلال أعوام كثيرة . فمثلا ، يمكن التعبير عن مقياس درجات الحرارة بطريقة مناسبة بدلالة نقطتى غليان وتجمد الماء النقى* .

فإذا وضع الجهاز المبين فى الشكل ١٠ – ١ فى وعاء يحتوى على الماء والثلج المنصهر فإن الزئبق سوف يصل إلى مستوى معين فى الأنبوبة الشعرية . عندئذ توضع علامة عند ذلك المستوى . يوضع الجهاز الآن فى ماء يغلى (عند ضغط جوى قدره 760 mmHg) وتوضع علامة أخرى على الأنبوبة الشعرية عند هذا المستوى الجديد

* ظل مقياس درجات الحرارة المقبول عالميا معرفا بدلالة هاتين النقطتين المرجعيتين حتى عام ١٩٥٤ . وسوف نناقش المقياس العيارى لدرجات الحرارة الذى تم تبنيه فى هذا العام بعد مناقشة قانون الغاز . انظر الجزء ١٠ – ٧ .

الأعلى للزئبق . هناك ثلاث طرق شائعة لوضع الأرقام على طول الأنبوبة الشعرية لقراءة درجة الحرارة وهى تعطى ثلاثة تدريجات مختلفة لدرجات الحرارة . وهذا موضح فى الشكل ١٠ – ٢ الذى يبين علامتى التدريج السابق تعيينهما وكذلك المقاييس الثلاثة المختلفة التى يمكن تركيبها عليهما .



شكل (١٠ – ٢)
يمكن استخدام نقطتى غليان وتجمد الماء لتوضيح العلاقة المتبادلة بين مقاييس درجات الحرارة العادية الثلاثة .

يجب أن نلاحظ أن مقياس سلسيوس (الذى كان يسمى المقياس المئوى فيما سبق) ومقياس كلفن لدرجات الحرارة يقسمان المنطقة من نقطة غليان الماء إلى نقطة تجمده إلى *100* جزء تسمى الدرجات ، بينما يقسم مقياس فهرنهيت هذه المنطقة إلى *180* درجة . إذن درجة سلسيوس (أى الدرجة المئوية) أكبر من درجة فهرنهيت بمقدار $\frac{180}{100}$ أو $\frac{9}{5}$.

يستخدم مقياس سلسيوس لدرجات الحرارة فى جميع أنحاء العالم . وسوف تنتقل الولايات المتحدة رسميا إلى هذا المقياس عندما تتحول إلى النظام المترى . وبالرغم من أن مقياس فهرنهيت كان يستخدم فى وقت ما على نطاق واسع فى جميع الدول المتحدثة بالانجليزية فإن من النادر استخدامه الآن خارج الولايات المتحدة . ويستخدم مقياس كلفن درجات حرارة تساوى درجات الحرارة فى مقياس سلسيوس ، ولكن نقطة الصفر فيه مختلفة ، ومقياس كلفن هو المقياس الذى يستخدمه العلماء عادة .

ويجب أن نوضح هنا أن الترمومتر الزئبقى المذكور آنفا لايعمل تحت درجة 39°C – لأن الزئبق يتجمد عند هذه الدرجة ، ومن الممكن التغلب على هذه الصعوبة باستخدام الكحول أو البنتان أو أى سائل آخر درجة تجمده منخفضة لقياس درجات الحرارة المنخفضة . بالإضافة إلى ذلك فإن أى سائلين لايتمددان بنفس الطريقة تماما فى كل مدى درجات الحرارة . من هذا تتضح الحاجة إلى طريقة قياسية أكثر دقة لتقسيم مقاييس درجات الحرارة ، وتبنى هذه الطريقة على ترمومتر يستخدم الغاز بدلا من السائل .

وبالرغم من أن الترمومترات التى كنا نناقشها هى أكثر الترمومترات شيوعا إلا أن هناك أنواع أخرى من الترمومترات . ومن ناحية المبدأ يمكن استخدام أى كمية فيزيائية تتغير بطريقة متكررة مع درجة الحرارة كجهاز لقياس درجات الحرارة .

وتحدد الاعتبارات العملية نوع الجهاز الذى يجب أن يستخدم فى ظروف معينة ، وربما كان الثرمستور واحدا من أكثر هذه الأجهزة نفعا . ذلك لأن المقاومة الكهربائية للثرمستور تتغير مع درجة الحرارة ، ويمكن تحويل هذا التغير فى المقاومة كهربائيا إلى قراءة لدرجة الحرارة على مقياس مترى . والثرمستور نفسه قد يكون صغيرا جدا ويمكن توصيلة إلى جهاز القراءة بواسطة أسلاك دقيقة . وحيث أن زمن استجابته فى حدود ثانية واحدة فإن قراءته لحظية تقريبا . ويستخدم هذا الجهاز على نطاق واسع فى الطب والصناعة على السواء .

مثال توضيحى ١٠ – ١ : درجة الحرارة فى غرفة هى 77°F . ماهى درجة حرارة بالتدريج السلسيوسى فى هذه الغرفة ؟

طريقة الحل : تحل مثل هذه المسائل دائما بالطريقة الآتية :

١ – أوجد عدد درجات الحرارة الواقعة فوق أو تحت نقطة تجمد الماء (32°F أو 0°C) .

٢ – استخدم حقيقة أن الدرجة الفهرنهيتية تكافىء $^5/_9$ من درجة سلسيوس لتحويل الدرجات من أحد النوعين إلى الآخر .

٣ – أوجد درجة الحرارة على المقياس الجديد بإضافة (أو طرح) 32°F أو 0°C درجة الحرارة فى هذه المسألة هى 77°F . وهذه الدرجة أعلى من درجة التجمد بمقدار 77-32 = 45°F . ولكن 45°F تكافىء $(45)(^5/_9)$ = 25°C . إذن درجة الحرارة أعلى من نقطة التجمد بمقدار 25°C . وحيث أن نقطة التجمد هى 0°C فإن درجة الحرارة المطلوبة هى 25°C .

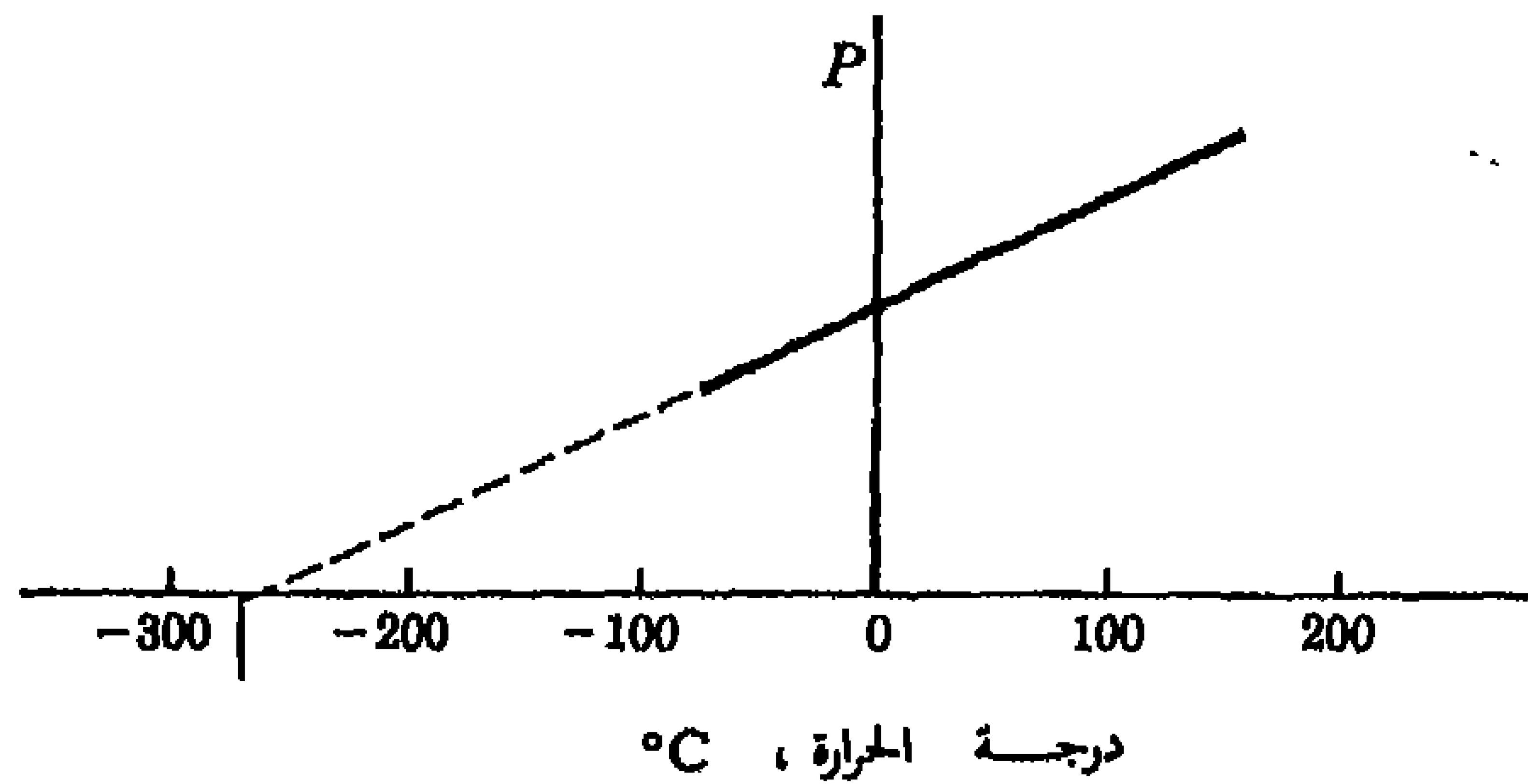
مثال توضيحي ١٠ – ٢ : ماهى درجة الحرارة على التدريج الفهرنهيتى فى يوم تكون فيه درجة الحرارة 10°C– ؟

طريقة الحل : درجة الحرارة فى هذا المثال أقل من درجة التجمد بمقدار 10°C . وحيث أن $1°F = 5/9\ °C$ ، فإن 10°C تكافئ: $(5/9)(10) = 18°F$. أى أن درجة الحرارة المطلوبة أقل من درجة التجمد بمقدار 18°F . وحيث أن درجة التجمد هى 32°F ، فإن الدرجة المطلوبة هى: $32-18 = 14°F$.

١٠ – ٣ قانون الغاز

يقوم كثير من الطلاب بإجراء تجارب بسيطة فى المختبرات العلمية بالمدارس والجامعات لتوضيح سلوك الغازات . والقانون الذى يحكم سلوك الهواء وكثير من الغازات بسيط ويمكن ايجاده بسهولة بالتجربة . ويحتوى هذا القانون على ثلاثة متغيرات هى الضغط ودرجة الحرارة وعدد الجزيئات فى وحدة الحجوم . لنتعرف الآن على الحقائق التى تخبرنا بها التجارب العلمية عن العلاقة بين هذه المتغيرات الثلاثة .

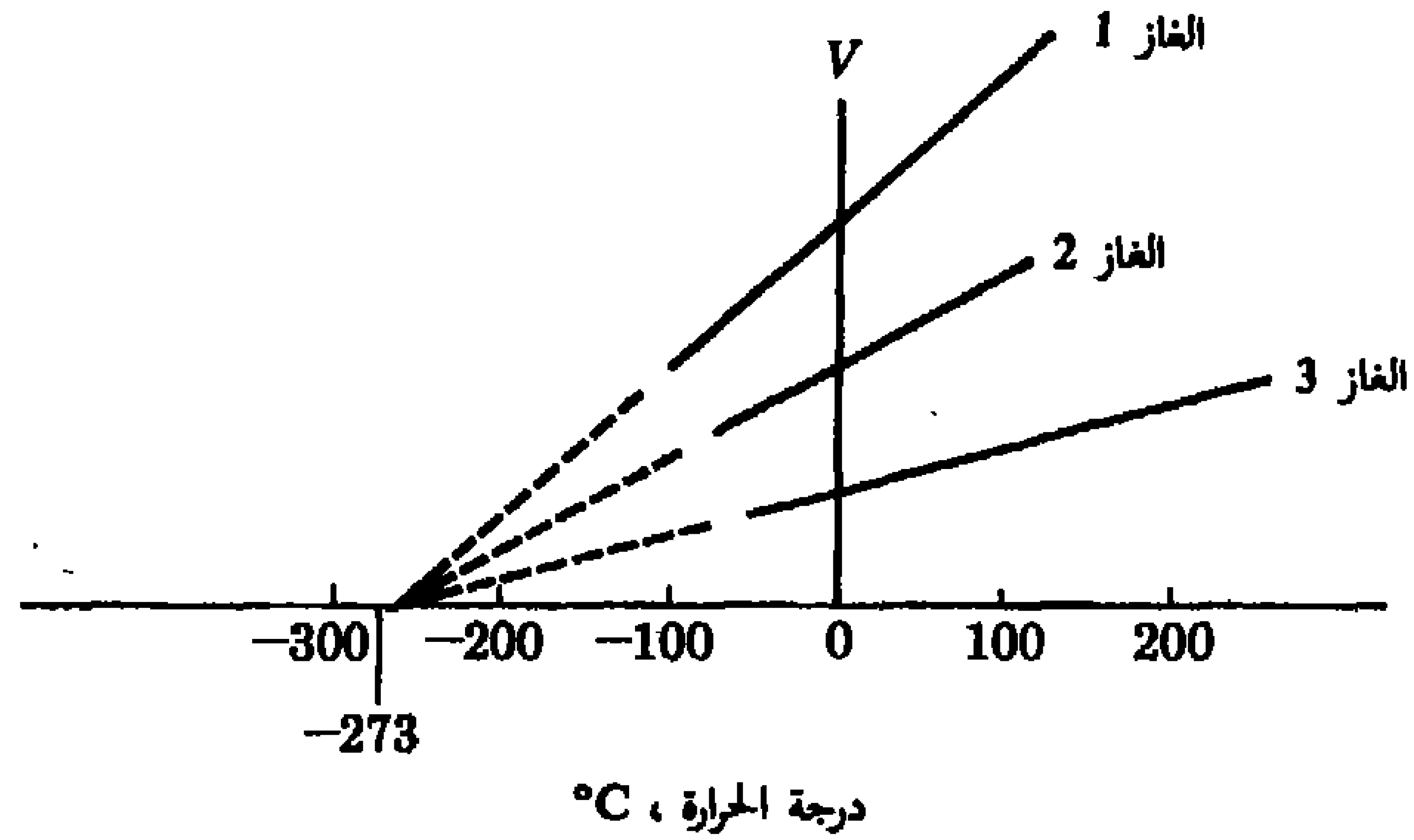
اذا سخنت كمية من الغاز مع حفظ حجمها ثابتا فإن ضغطها يزداد . ويبدو الشكل البيانى الذى يمثل الضغط المقاس مقابل درجة الحرارة مشابها لما هو مبين فى الشكل ١٠ – ٣ بدرجة كبيرة . وتعطى مختلف الغازات ذات الضغوط الابتدائية المختلفة رسوما بيانية مشابهة . ولكن طالما لم تكن الغازات قريبة من ظروف إسالتها فإن الشكل البيانى سيكون خطا مستقيما . بالإضافة إلى ذلك فإن الجزء من محور درجات الحرارة الذى يقطعه الخط هو $-273.15°C$ دائما .



شكل (١٠ – ٣)
عند تسخين كمية من الغاز محبوسة فى وعاء يتغير ضغطها تغيرا خطيا مع درجة الحرارة . وفى المقياس المطلق يمكن كتابة معادلة هذا الخط على الصورة $P = (\text{const})(T)$

التجربة البسيطة الأخرى هى قياس حجم غاز كدالة فى درجة الحرارة مع حفظ ضغطه ثابتا . ويمثل الشكل ١٠ – ٤ الرسم البيانى النموذجى للحجم المقاس مقابلا لدرجة الحرارة . ومرة أخرى نحصل على علاقة خطية والجزء المحصور من الخط هو $-273.15°C$ أيضا . وبالرغم من أن مختلف الغازات ومختلف الحجوم تعطى خطوطا مختلفة (بشرط ألا يكون الغاز قريبا من الإسالة) فإن الجزء المحصور واحد دائما .

شكل (١٠ - ٤)
عندما ينكمش الغاز عند ضغط ثابت فإنه يبرد . وفى المقياس المطلق لدرجات الحرارة يمكن كتابة معادلة الخط المستقيم فى حالة الغاز المثالى على الصورة
$V = (\text{const})(T)$



لاحظ أن الجزء المحصور من محور درجات الحرارة فى كلا الشكلين ١٠ - ٣ و ١٠ - ٤ هو $-273.15°C$، وتؤخذ هذه القيمة كنقطة الصفر على المقياس المطلق (أو مقياس كلفن) لدرجات الحرارة . لنرمز إلى درجات الحرارة المطلقة بالرمز T . عندئذ يمكن تمثيل الشكلين البيانيين بالعلاقة .

$$PV = (\text{const})(T)$$

ولكى نتحقق مما إذا كان الشكل ١٠ - ٣ يحقق المعادلة السابقة يجب أن نتذكر أن V ثابت فى هذه الحالة . إذن :

$$P = \left(\frac{\text{const}}{V}\right)(T) = (\text{const})(T)$$

وهى معادلة خط مستقيم فى الشكل البيانى الذى يمثل تغير الضغط P مع درجة الحرارة المطلقة T . ويلاحظ أن $P = 0$ عندما تكون $T = 0$ أى $t = -273.15°C$ أى أن الشكل ١٠ - ٣ يحقق المعادلة . بالمثل ، إذا كان $P = \text{const}$ فإن المعادلة تصبح :

$$V = \left(\frac{\text{const}}{P}\right)(T) = (\text{const})(T)$$

وهى معادلة خط مستقيم يتقاطع مع محور درجات الحرارة عند $T = 0$ (أو $t = -273.15°C$) . أى أن المعادلة تتفق مع البيانات الموضحة فى الشكل ١٠ - ٤ .

نستنتج من ذلك أنه طالما كان الغاز بعيدا عن شروط إسالته فإنه يتبع تعريف المعادلة :

$$PV = (\text{const})(T) \qquad (١٠ - ١)$$

من المهم أن ندرك أن T هى درجة الحرارة المطلقة (كلفن) للغاز .

يعرف الغاز الذى يتبع المعادلة (١٠ — ١) **بالغاز المثالى** . وسنرى فيما بعد أن الثابت فى المعادلة (١٠ — ١) ذو قيمة محددة يمكن إيجادها بسهولة . وقبل أن نبدأ مناقشة قيمة هذا الثابت يجب أولا أن نقدم عددين يستخدمان عادة للتعبير عنه .

١٠ — ٤ الجزىء الجرامى (مول) وعدد أفوجادرو

عند التعامل مع الذرات والجزيئات يكون من المناسب عادة تذكر عدد ذى أهمية أساسية ، وهذا العدد يسمى **عدد أفوجادرو** ، ويمثل بالرمز N_A . وكان هذا العدد معروفا للكيميائيين حتى قبل أن يعرف الكثير عن الذرات . وقد استنتج أفوجادرو من الطريقة التى تتحد بها الذرات لتكوين الجزيئات أن الكتلة الذرية* من المادة تحتوى دائما على عدد معين من الذرات ، وهذا العدد هو N_A .

فمثلا ، قد تذكر من علم الكيمياء أن الكتلة الذرية للايدروجين هى 1.0 . إذن ، 1 kg من الايدروجين يحتوى على عدد قدره N_A من ذرات الايدورجين . كذلك ، حيث أن الكتلة الذرية للكلور هى 35.5 ، فإن كل 35.5 kg من الكلور تحتوى على عدد قدره N_A من ذرات الكلور .

يستخدم نفس العدد فى حالة الجزيئات . وحيث أن الكتلة الذرية للأكسجين هى 16 فإن الكتلة الجزيئية* للماء H_2O هى 18 . إذن ، يحتوى كل 18 kg من الماء على عدد قدره N_A من جزيئات الماء . وكما نرى فإن N_A عدد هام جدا .

لتعيين N_A يجب أن نلجأ إلى التجربة ، وأحسن قيمة تجريبية لعدد أفوجادرو أمكن الحصول عليها حتى الآن هى :

عدد أفوجادرو

$$N_A = 6.022 \times 10^{26} \text{ particles/kg mol}$$

لاحظ « الوحدات » التى الحقت بالعدد N_A ، وتستخدم هذه « الوحدات » للأغراض الوصفية ولكنها ليست وحدات بالمعنى المفهوم . ويعطى معنى هذه الوحدات بالتعريف التالى : **الجزىء الكيلوجرامى** من المادة هو كمية المادة بالكيلوجرامات التى تحتوى على N_A من جسيمات المادة ، وهو يساوى عدديا الكتلة الذرية أو الجزيئية لذرات أو جزيئات المادة .

تعريف

---

* يستخدم كثير من الناس المصطلحون الفنيين « الوزن الذرى والوزن الجزيئى » بدلا من « الكتلة الذرية والكتلة الجزيئية » .

يعبر كثير من الناس عن عدد أفوجادرو N_A بوحدات أخرى ، فهم يستخدمون الجزىء الجرامى (g mol) بدلا من الجزىء الكيلوجرامى . وحيث أن الجرام يساوى $^1/_{1000}$ kg فإن :

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ particles/g mol}$$

وكثيرا جدا ماتحذف كلمة « الجرامى » فى هذا النظام للوحدات . فعندما تعطى كمية معينة بالمول فإن الكاتب أو المتحدث يعنى دائما الجزيئات الجرامية . ومع ذلك فإن الجزىء الكيلوجرامى هو المناسب فى نظام الوحدات SI ، لذلك يجب ألا ننسى أننا سنستخدم الجزيئات الكيلوجرامية فى أسئلتنا .

مثال توضيحى ١٠ – ٣ : الكتلة الذرية للكربون هى 12.0 . اوجد كتلة ذرة الكربون بالكيلوجرام . (تعطى الكتل الذرية دائما بدون وحدات . ومع ذلك فإننا قد أضفنا « الوحدة » kg/kg mol للأغراض الوصفية) .

طريقة الحل : نعلم أن كل 120 kg من الكربون تحتوى على عدد من الجزيئات قدره N_A . إذن ، الكتلة لكل ذرة هى :

$$\text{الكتلة لكل ذرة كربون} = \frac{12.0 \text{ kg/kg mol}}{N_A} = \frac{12.0 \text{ kg/kg mol}}{6.02 \times 10^{26} \text{ atoms/kg mol}}$$
$$= 1.99 \times 10^{-26} \text{ kg/atom}$$

ويمكن استخدام نفس هذه الطريقة لإيجاد كتلة أى ذرة أو جزىء بمعلومية الكتلة الذرية أو الجزيئية .

١٠ – ٥ ثابت قانون الغاز

لنعد الآن إلى قانون الغاز المثالى :

$$PV = (\text{const})(T)$$

حيث P ضغط كمية معينة من غاز مثالى حجمها V ودرجة حرارتها المطلقة T . ويمكن إيجاد قيمة الثابت بواسطة التجارب التى وصفناها فى الجزء ١٠ – ٣ ، وقد وجد أن قيمة هذا الثابت هى nR ، حيث n عدد الجزيئات الكيلوجرامية من الغاز فى حجم قدره V و :

$$R = 8314 \text{ J/(kg mol)(K)} = 8.314 \text{ J/(g mol)(K)}$$

يمكننا إذن كتابة **قانون الغاز المثالى** كمايلى :

$$PV = nRT \qquad (١٠ - ٢)$$

من المهم جدا عند تطبيق هذا القانون أن نراعى استخدام الوحدات المناسب لمختلف الكميات المستخدمة . ويجب أن يعبر عن درجة الحرارة دائما بالكلفن . وإذا كان n عدد الجزيئات الكيلوجرامية فى الحجم V ، فإن R يجب أن تكون 8314 J/(kg mol)(K) . أما اذا أردت لأى سبب أن تستخدم n بالجزيئات الجرامية فإن R يجب أن تكون 8.314 J/ (g mol)(K) .

مثال توضيحى ١٠ – ٤ : الضغط الجوى ودرجة الحرارة العياريين هما 1.01×10^5 N/m² و 0°C . اوجد الحجم الذى يحتله 1 kg mol من غاز النيتروجين N_2 فى هذه الظروف ، علما بأن الكتلة الجزيئية للنتروجين N_2 هى 28 .

طريقة الحل : لاستخدام قانون الغاز يجب أن نلاحظ فى هذه الحالة أن :

$$P = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$
$$T = 0 + 273.15 \text{ K} = 273.15 \text{ K}$$

حيث تقرأ القيمة الاخيرة هكذا « 273.15 درجة كلفن » . وحيث أننا نهتم بالحجم الذى يحتله 1 kg mol ، فإن $n = 1$ kg mol . إذن المعادلة :

$$PV = nRT$$

تصبح :

$$(1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2)V = (1 \text{ kg mol}) \left[8314 \frac{\text{J}}{(\text{kg mol})(\text{K})}\right](273 \text{ K})$$

ومنه نجد أن :

$$V = 22.4 \text{ m}^3/\text{kg mol}$$

يجب أن تكون قادرا على تعميم هذا المثال لإثبات مايلى :

> يحتل الجزىء الكيلوجرامى الواحد من غاز مثالى حجما قدره 22.4 m³ عند الضغط ودرجة الحرارة العياريين .

ومن المناسب أحيانا تذكر هذه الحقيقة .

١٠ – ٦ الأساس الجزيئى لقانون الغاز

ناقشنا حتى الآن ضغط الغازات من وجهتى نظر مختلفتين . وقد رأينا فى الفصل السادس كيف تمارس جزيئات الغاز ضغطا على جدران الوعاء نتيجة لتصادمات

الجزيئات بها . وقد وجدنا أن الضغط يرتبط بطاقة حركة جزيئات الغاز . ويمكننا كتابة النتيجة التى توصلنا اليها ، باستخدام رموز مختلفة قليلا ، كمايلى :

$$P = (\tfrac{2}{3})(\nu_0)(\tfrac{1}{2}m_0v^2) \qquad (٦ - ٦)$$

حيث ν_0 عدد الجزيئات فى وحدة الحجوم . m_0 كتلة الجزىء الواحد ، $\frac{1}{2}m_0v^2$ متوسط طاقة حركة الجزىء . لاحظ أن درجة الحرارة لاتظهر فى هذه المعادلة .

من ناحية أخرى ، ينص قانون الغاز المثالى ، المستنتج تجريبيا ، على أن :

$$PV = nRT \quad \text{أو :} \quad P = \frac{nRT}{V}$$

وبمقارنة هذه المعادلة بالمعادلة (٦ - ٦) نجد أن :

$$(\tfrac{1}{3})\nu_0 m_0 v^2 = \frac{nRT}{V}$$

أو ، بعد إعادة الترتيب :

$$T = \frac{(\nu_0 V)m_0v^2}{3nR}$$

ولكن $\nu_0 V$ هو ببساطة العدد الكلى للجزيئات فى الحجم V ، بينما n هو عدد الجزيئات الجرامية من الغاز فى هذا الحجم . وحيث أن العدد الكلى للجزيئات فى الحجم V يعطى أيضا بالكمية nN_A ، يمكننا إذن استبدال $\nu_0 V$ بالكمية nN_A لنحصل على :

$$T = \frac{2N_A}{3R}\tfrac{1}{2}m_0v^2$$

وبالطبع فإن N_A/R ببساطة مقدار ثابت ، وقيمته هى :

$$\frac{N_A}{R} = \frac{6.02 \times 10^{26}\ \text{kg mol}^{-1}}{8314\ \text{J/(kg mol)(K)}} = 7.24 \times 10^{22}\ \text{K/J}$$

ويسمى مقلوب هذه الكمية ، أى R/N_A ، عادة **ثابت بولتزمان** ويرمز له بالرمز k .

إذن :

$$k = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$$

وعلى أى حال فإننا نرى أن **درجة الحرارة المطلقة** للغاز المثالى تعطى بالعلاقة :

$$T = \tfrac{1}{2}m_0 v^2 \frac{2N_A}{3R} \qquad (١٠ - ٣)$$

إذن ، درجة الحرارة المطلقة مقياس لطاقة الحركة الانتقالية لجزيئات الغاز . وهذه حقيقة ذات أهمية كبيرة كما سنعلم حالا .

مثال توضيحى ١٠ - ٥ : احسب متوسط سرعة جزيئات النتروجين فى الهواء فى الظروف العيارية .

طريقة الحل : فى الظروف العيارية تكون درجة الحرارة 0°C أو 273.15 K .

من المعادلة (١٠ - ٣) نجد أن :

$$v^2 = \frac{3RT}{N_A m_0}$$

لإيجاد m_0 لجزيئات النتروجين يجب أن نلاحظ أن الكتلة الجزيئية لغاز النتروجين N_2 هى 28 . إذن :

$$m_0 = \frac{28\ \text{kg/kg mol}}{N_A}$$

وبالتعويض نجد أن :

$$v^2 = \frac{3RT}{28\ \text{kg/kg mol}}$$

وحيث أن $R = 8314\ \text{J/(kg mol)(K)}$ و $T = 273\ \text{K}$ ، نجد أن :

$$v^2 = \frac{(3)(8314)(273)}{28} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

أو :

$$v = 493\ \text{m/s}$$

أى أن متوسط سرعة جزيئات الهواء حوالى *500 m/s* .

١٠ - ٧ استخدام قانون الغاز

وجد أن قانون الغاز المثالى ينطبق على جميع الغازات بشرط أن تتحقق الشروط التالية :

١ - يجب أن يكون الحجم الذى تشغله الجزيئات نفسها ، أى الجزىء الواحد مضروبا فى عدد الجزيئات ، جزءا مهملا من الحجم المحبوس فيه الغاز .

٢ – يجب أن تكون طاقة الحركة الانتقالية للغازات كبيرة بالمقارنة بالطاقة اللازمة لفصل جزيئين من الغاز عن بعضهما .

يتعلق الشرط الأخير بحقيقة أن الذرات والجزيئات غير المشحونة تتجاذب عادة مع بعضها البعض . نتيجة لذلك يحاول الجزيئان أن يلتصقا ببعضها . ويخبرنا الشرط الثانى أن الطاقة اللازمة لفصل جزىء عن الآخر يجب أن تكون صغيرة بالمقارنة بمتوسط طاقة حركتها الانتقالية .

ولكننا نعلم أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية للجزىء يرتبط مع درجة الحرارة المطلقة طبقا للمعادلة (١٠ – ٣) . يمكننا إذن إعادة صياغة الشرط الثانى بالطريقة التالية :

٢' – يجب أن تكون درجة الحرارة عالية بدرجة كافية لأن نتأكد أن عددا قليلا فقط من الجزيئات تلتصق ببعضها البعض .

وبالطبع ، عندما تلتصق الجزيئات سويا فإن الغاز يتكثف ويتحول إلى سائل . وهذا يسمح لنا إذن بصياغة الشرط الثانى بطريقة أخرى :

٢'' – يجب أن يكون الغاز بعيدا عن شروط إسالته .

يتحقق الشرط الثانى عادة فى حالة تلك الغازات كالهواء والأكسجين والنيتروجين والهليوم والأيدروجين وجميع الغازات صعبة الإسالة . ويتحقق الشرط الأول فى حالة الغازات التى كثافتها مقارنة بكثافة الهواء أو أصغر منها .

يمكننا رؤية إحدى السمات الهامة للمعادلة (١٠ – ٣) (والشكلين ١٠ – ٣ و ١٠ – ٤) إذا لاحظنا مايحدث عند الصفر المطلق($T = 0$ K) حيث أن T تتناسب مع طاقة الحركة الانتقالية للجزيئات ، إذن عندما يكون $T = 0$ فإن طاقة الحركة يجب أن تكون صفرا كذلك . أى أن الجزيئات تتوقف عن الحركة ، ولهذا فإنها لاتسبب أى ضغط . وهذا هو السبب فى أن $P = 0$ فى الشكل ١٠ – ٣ عندما تكون $T = 0$. هل يمكنك أن تشرح لماذا يكون $V = 0$ عندما تكون $T = 0$ كما هو مبين فى الشكل ١٠ – ٤ ؟

ولكن من المستحيل بالطبع تبريد أى غاز إلى الصفر المطلق بدون أن يتكثف . أى أن الشرطين الأول والثانى تبطل صحتهما قبل أن نقترب من درجة الحرارة $T = 0$ ، وعليه فإن معادلتنا (قانون الغاز المثالى) لاينطبق . وفى الحقيقة فإن الغازات تسلك سلوكا غريبا بالقرب من الصفر المطلق . فى هذه الحالة لاتنطبق الفيزياء الكلاسيكية . وبدلا من ذلك ، كما سنرى لاحقا ، تصبح التأثيرات الكمية هامة ، وتؤدى إلى تلك الظواهر كفوق السيولة (سوائل صفرية اللزوجة) وفوق الموصلية (موصلات صفرية المقاومة الكهربائية) .

وبالرغم من هذه القيود على الغاز المثالى فإن مجال تطبيق هذا القانون واسع جدا . ويعتبر استخدام هذا القانون لتعريف مقياس كلفن لدرجات الحرارة واحدا من تطبيقاته الأساسية . لتحقيق ذلك يجب أن نذكر أن قانون الغاز يمكن كتابته على الصورة :

$$P = (\text{const})(T)$$

إذا كان الحجم V ثابتا . فإذا أمكن إيجاد قيمة الثابت فإن T يمكن حسابها من قياس الضغط P .

لإيجاد قيمة هذا الثابت اتفق فى عام ١٩٥٤ على أن درجة الحرارة 273.16 K هى النقطة الثلاثية للماء . (**النقطة الثلاثية للماء** هى درجة الحرارة الوحيدة التى يتواجد فيها الماء والثلج وبخار الماء سويا فى آن واحد) . افترض الآن أن الضغط فى وعاء ثابت الحجم يحتوى على غاز مثالى قد قيس عند النقطة الثلاثية للماء . عندئذ سيكون P معلوما ودرجة الحرارة $T = 273.16$ k من التعريف . إذن يمكن تعيين قيمة الثابت فى المعادلة $P = (\text{const})(T)$.

وحيث أن الثابت معلوم فإن الغاز الموجود فى الوعاء يمكن استخدامه لقياس درجة الحرارة . لتحقيق ذلك يقاس الضغط P ثم يعوض فى العلاقة $P = (\text{const})(T)$ ببساطة لإيجاد T . وبالطبع يستخدم الترمومتر الغازى نادرا لأنه غير مناسب . ولكن عندما تدعو الحاجة يمكن استخدام الترمومتر الغازى لمعايرة أى نوع آخر من الترمومترات يراد استخدامه .

ويعتبر قانون الغاز المثالى أكثر نفعا للكثير منا من ناحيتين آخريين إذ يمكننا استخدامه لحساب P أو V أو n أو T إذا كانت جميع الكميات معلومة عدا واحدة فقط . كذلك إذا كانت الكميات P و V و n و T معلومة تحت مجموعة معينة من الشروط فإن من الممكن حساب هذه الكميات تحت شروط أخرى . وتوضح الأمثلة الآتية هذه الاستخدامات .

مثال توضيحى ١٠ — ٦ : أغلق برميل فارغ عند درجة حرارة 20°C . ووضع البرميل بعد ذلك فى الشمس وترك حتى ارتفعت درجة حرارته إلى 200°C فإذا كان الضغط الابتدائى 1.0 atm ، فما هو الضغط النهائى فى البرميل ؟

طريقة الحل : تكتب المعادلة (١٠ — ٢) مرتين :

$$P_1 V = nRT_1 \qquad P_2 V = nRT_2$$

حيث V هو الحجم الثابت للبرميل ، n عدد الجزيئات الجرامية من الغاز فى البرميل . بقسمة إحدى المعادلتين على الأخرى نحصل على :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

حيث T_1 ، T_2 هما درجتى الحرارة المطلقتان . ولكن $P_1 = 1\ \text{atm}$ ، $T_1 = 20 + 273 = 293\ \text{K}$ ، $T_2 = 473\ \text{K}$. إذن :

$$P_2 = (1.0\ \text{atm})\left(\frac{473\ \text{K}}{293\ \text{K}}\right) = 1.61\ \text{atm}$$

لاحظ أننا قد استخدمنا درجتى الحرارة المطلقتين . ووحدات الضغط ليست هامة طالما كانت واحدة .

مثال توضيحى ١٠ – ٧ : ضغط الغاز الموجود فى كباس محرك ديزل فجأة عندما كانت درجة حرارته 27°C وضغطه 74cm Hg فى البداية . فإذا كان الضغط النهائى للغاز 3700 cm Hg ودرجة حرارته النهائية 547°C ، فما هو الحجم النهائى للغاز بدلالة الحجم الابتدائى ؟

طريقة الحل . يكتب قانون الغاز مرتين :

$$P_1V_1 = nRT_1 \qquad P_2V_2 = nRT_2$$

بالقسمة نحصل على :

$$\frac{P_1V_1}{P_2V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

وبالتعويض نجد أن :

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)\left(\frac{74}{3700}\right) = \frac{273 + 27}{273 + 547}$$

ومنه :

$$V_2 = 0.058\, V_1$$

مثال توضيحى ١٠ – ٨ : نفخ إطار سيارة إلى ضغط قدره 32 lb/in² فى يوم بارد درجة الحرارة فيه -3°C . ماهو الضغط فى الإطار عندما ترتفع درجة الحرارة فى الإطار إلى +47°C (افترض أن حجم الإطار يظل ثابتا) .

طريقة الحل . مرة أخرى :

$$\frac{P_1V_1}{P_2V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

ولكن $V_1 = V_2$ ، $T_1 = 270\ \text{k}$ ، $T_2 = 320\ \text{k}$. لاحظ أن مقياس ضغط إطارات السيارات يقرأ زيادة الضغط داخل الإطار عن الضغط الجوى . (فإذا كان

الضغط الداخلى هو الضغط الجوى فإن المقياس يقرأ صفراً) . وبفرض أن الضغط الجوى هو $14.7\ lb/in^2$ ، إذن $P_1 = 46.7\ lb/in^2$ ومن ثم :

$$P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1} = (46.7\ lb/in^2)\left(\frac{320\ K}{270\ K}\right) = 55.4\ lb/in^2$$

أى أن قراءة المقياس ستكون $40.7\ lb/in^2$.

مثال توضيحى ١٠ – ٩ : إذا كان حجم خزان لغاز الأكسجين هو 4 liters* عند درجة حرارة قدرها 0°C وضغط قدره 50 atm ، فما هى كتلة الأكسجين الموجود فى الخزان ؟

طريقة الحل . سنحل هذه المسألة بطريقتين مختلفتين :

الطريقة الأولى : سنوجد أولا الحجم الذى يشغله هذا الغاز عند درجة الحرارة والضغط العياريين :

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} = 1$$
$$(50\ atm)(4\ liters) = (1\ atm)(V_2)$$
$$V_2 = 200\ liters = 0.20\ m^3$$

ولكن $22.4\ m^3$ تحتوى على 1 kg mol من غاز الاكسجين O_2 عند هذه الظروف . وحيث أن الكتلة الذرية للأكسجين 16 وكتلته الجزيئية 32 ، إذن كتلة الأكسجين الموجودة فى الخزان هى :

$$\text{الكتلة} = \left(\frac{0.2\ m^3}{22.4\ m^3/kg\ mol}\right)(32\ kg/kg\ mol)$$
$$= 0.285\ kg \doteq 285\ g$$

والطريقة الثانية : نستخدم قانون الغاز مباشرة ، أى المعادلة (١٠ – ٢) :

$$PV = nRT$$

ثم نعوض عن P بالمقدار $(50)(1.01 \times 10^5\ N/m^2)$ وعن V بالمقدار $4 \times 10^{-3}\ m^3$ بوضع $R = 8314\ J/(kg\ mol)(K)$ ، $T = 273\ K$ ، نجد أن :

$$n = 8.9 \times 10^{-3}\ kg\ mol$$

ولكن 1 kg mol من الأكسجين هو 32 ، إذن كتلة الغاز الموجود فى الخزان ببساطة هى :

$$\text{Mass} = (8.9 \times 10^{-3}\ kg\ mol)(32\ kg/kg\ mol) = 0.285\ kg$$

---

* يعرف اللتر ، وهو وحدة معروفة لك من الكيمياء ، بأنه حجم قدره $1000\ cm^3$

مثال توضيحى ١٠ – ١٠ : ماقيمة كتلة الجزىء الواحد من ثانى اكسيد الكربون CO_2 ؟

طريقة الحل . الكتلة الذرية للكربون 12 وللاكسجين 16 . إذن الكتلة الجزيئية لثانى أكسيد الكربون CO_2 هى 44 وحيث أن 44 kg . من ثانى أكسيد الكربون CO_2 تحتوى على عدد أفوجادرو من الجزيئات أى 6.02×10^{26} ، إذن كتلة الجزىء هى :

$$m_0 = \frac{44\ \text{kg}}{6.02 \times 10^{26}} = 7.33 \times 10^{-26}\ \text{kg}$$

١٠ – ٨ تغير السرعات الجزيئية فى الغازات :

رأينا فى الاجزاء السابقة أن درجة الحرارة مقياس لطاقة الحركة الجزيئية . وبالتحديد ، نرى من المعادلة (١٠ – ٣) أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزىء الغاز هى ببساطة :

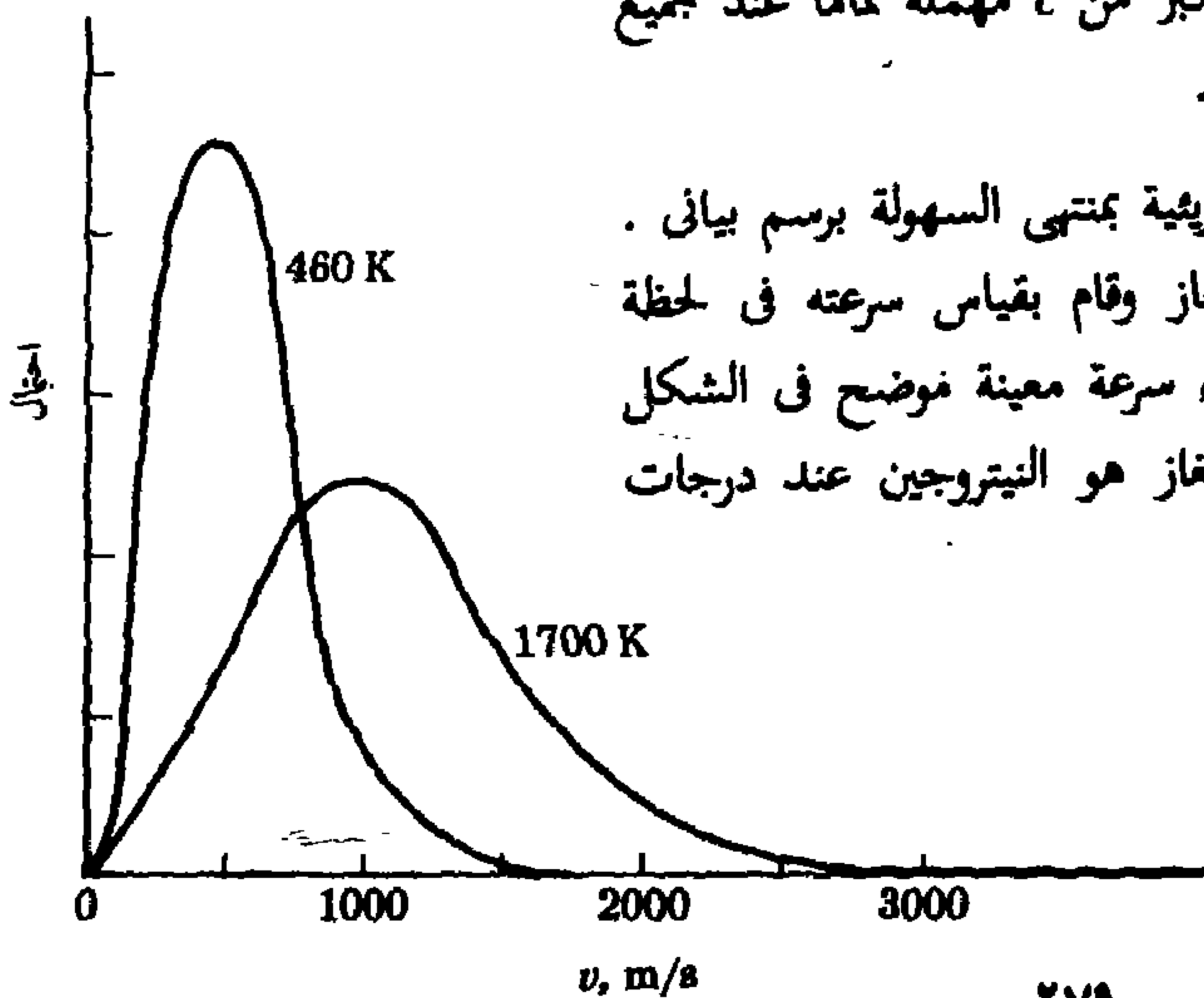
$$\text{طاقة الحركة الانتقالية} = \tfrac{1}{2}m_0v^2 = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{R}{N_A}\right)T = \tfrac{3}{2}kT \qquad (١٠ - ٤)$$

حيث k ثابت بولتزمان ، أى R/N_A . ولكننا نعلم بالطبع آن جميع الجزيئات لا تتحرك بنفس السرعة وأن طاقات حركتها ليست متساوية . بالإضافة إلى ذلك فإن سرعة جزىء معين عرضة للتغير نتيجة لتصادمات الجزيئات بعضها ببعض .

وقبل أن يكتسب العلماء المهارات العملية التى تمكنهم من قياس سرعات جزيئات الغاز مباشرة استطاع جيمس كليرك ماكسويل أن يتنبأ بها . وقد أثبت ، نظريا على الأقل ، أن جزىء الغاز يستطيع أن يصل إلى أية سرعة بين الصفر واللانهاية . ونحن نعلم الآن أن أى جسيم لا يمكن أن يتحرك بسرعة تزيد عن سرعة الضوء c . بناء على ذلك فإن التنبؤ المتعلق بالسرعة اللانهائية خطأ واضح . ومع ذلك فإن تنبؤه قد أثبت أن فرصة (أو احتمال) أن تكون سرعة الجزىء أكبر من c مهملة تماما عند جميع درجات الحرارة العادية ، رغم أنها لازالت محدودة .

يمكن توضيح تنبؤ ماكسويل عن السرعات الجزيئية بمنتهى السهولة برسم بيانى . افترض أن شخصا قد اختار جزيئا معينا من الغاز وقام بقياس سرعته فى لحظة الاختيار . واحتمال (أو فرصة) أن يكون للجزىء سرعة معينة موضح فى الشكل ١٠ – ٥ ، وقد افترضنا لأغراض هذا المثال أن الغاز هو النيتروجين عند درجات

شكل (١٠ – ٥)
احتمال أن يتحرك جزىء النيتروجين فى غاز بسرعة معينة عند درجة الحرارة المبينة يتناسب مع ارتفاع المنحنى عند هذه السرعة المحددة .



الحرارة المبينة . ونحن نرى من الشكل أن الاحتمال الأكبر هو أن تكون سرعة جزيئات النيتروجين قريبة من 500 m/s عند درجة الحرارة 460 k (187°C) . ومع ذلك فإن مدى السرعات الممكنة واسع جدا . ولايجب أن ندهش عندما نجد أن سرعة الجزىء المختار تساوى أى قيمة بين حوالى 50 m/s و 1500 m/s . وكما ذكرنا سابقا ، لاتصل المنحنيات فى الحقيقة إلى الصفر حتى إذا وصلت السرعات إلى مالانهاية . ولكن ، كما نرى ، فرصة وجود جزىء يتحرك بمثل هذه السرعة العالية صغيرة إلى أبعد حد ، وهى فى الواقع مهملة تماما فى الحالة الموضحة .

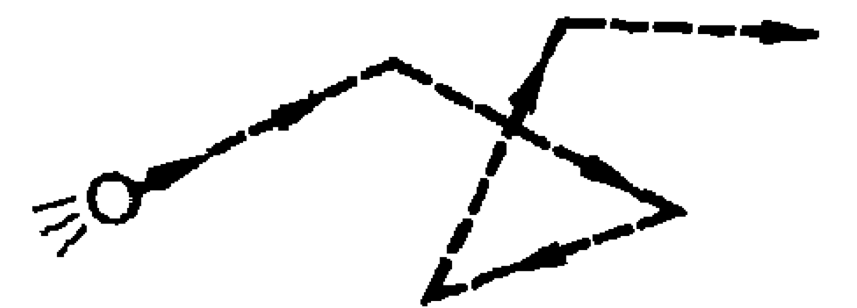
لم يكن فى الإمكان اختبار تنبؤات ماكسويل (التى أعلنها فى عام ١٨٦٠) عمليا إلا فى عام ١٩٢٦ . وعندما أجرى هذا الاختبار وجد أن التجربة تتفق اتفاقا ممتازا مع نتائج نظرية ماكسويل ، وقد أكدت التجربة أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزىء الغاز يساوى $\frac{3}{2}kT$ ، كما أنها أوجدت أيضا توزيع السرعات الذى تنبأ به ماكسويل .

١٠ - ٩ الحركة البروانية

تعتبر المفاهيم الجزيئية التى استخدمناها فى مناقشة قانون الغاز المثالى مفاهيم ذات أهمية تطبيقية كبيرة فى كثير من المجالات ، فكما رأينا حالا استطاع ماكسويل أن يتنبأ بتغير السرعات الجزيئية فى الغاز باستخدام هذه المفاهيم . وقد أمكن معالجة كثير من الأوجه الأخرى لسلوك الغازات بنجاح باستخدام نموذج الغاز المثالى . وفى الحقيقة فإن هذه النتائج لما يسمى **النظرية الحركية للغازات** قد أثبتت بكثير من التجارب العلمية المختلفة .

فى هذا الجزء ، وكذلك فى الجزءين التاليين ، سوف نناقش تطبيقات هذا النموذج على أنظمة لانعاملها عادة باعتبارها غازات . اعتبر جسيمات الدخان أو الغبار الدقيقة الموجودة فى الهواء أو الدقائق الغروانية (شبه الغروية ، كتلك التى تجعل الماء غير النقى عكر قليلا أو تجعل اللبن أبيض اللون) . تتصرف كل من هذه الجسيمات الدقيقة « كجزىء غازى » وتعطى طاقة حركتها الانتقالية بالمعادلة (١٠ - ٤) ، أى بالمقدار $\frac{3}{2}kT$. فاذا كانت طاقة الحركة هذه أكبر كثيرا من طاقة الوضع التثاقلية للجسيم فإن الجسيمات لن ترسب وتتراكم على قاع الوعاء . ولكنها سوف تطفو فى الهواء (فى حالة الغبار) أو السائل (فى حالة الدقائق الغروانية) كما لو كانت جزيئات غاز عادى تماما .

شكل (١٠ - ٦)
تتحرك الجسيمات الدقيقة المعلقة فى مائع حركة متعرجة تسمى الحركة البروانية .



وإذا نظرت إلى دقيقة الغبار أو الدقيقة الغروانية فى الميكروسكوب فإنك سترى أنها تتبع مسارا مغلولا كالمسار المبين فى الشكل ١٠ - ٦ ، وهذه الحركة عشوائية . وقد كان روبرت براون - وهو عالم نبات - أول من اكتشف هذا النوع من الحركة ، ويسمى **الحركة البروانية** . أما النظرية التفصيلية لهذه الظاهرة

فقد نشرها البرت اينشتين . (نشر اينشتين هذه النظرية فى عام ١٩٠٥ وهو نفس العام الذى اقترح فيه نظريتين شهيرتين أخريين هما النظرية النسبية ونظرية التأثير الكهربائى الضوئى) . وبالرغم من أن الدقائق أكبر كثيرا من جزيئات الغاز . فإن الأفكار العامة تنطبق على كليهما ، ذلك لأن هذه الدقائق تتصرف كغاز مثالى فى كثير من الوجوه .

من المهم أن نلاحظ بعناية سبب الحركة المتعرجة . حيث أن الجسيمات تتحرك بين كثير من الجزيئات المحيطة قبل تغيير مسارها ، فإن نقط تغير الاتجاه لاتمثل نقط تصادم . ولكنها تمثل النقط التى تكون فيها محصلة القوى التى تؤثر بها الجزيئات المحيطة على الجسيم كبيرة بمحض الصدفة . وبالرغم من أن القوة المحصلة التى تؤثر بها الجزيئات المحيطة على الجسيم قريبة من الصفر فى معظم الأحيان ، فإن الحال ليست كذلك دائما . فمن حين إلى آخر ، وبمحض الصدفة ، تصبح محصلة هذه القوة كبيرة . عندئذ ينحرف الجسيم تحت تأثير هذه القوة المحصلة الكبيرة .

يمكننا أن نفهم هذه الظاهرة بطريقة أفضل بالقياس والمقارنة . افترض أنك قد القيت 100 قطعة عملة معدنية على أرضية الغرفة ثم رمزت للقطعة التى تظهر فيها الصورة على الوجه العلوى بالرقم 1+ وللقطعة التى تظهر فيها الكتابة على الوجه العلوى بالرقم 1- ، عادة يكون عدد الأوجه العلوية التى تظهر عليها الصورة أو الكتابة واحدا تقريبا ، وبالتالى فإن المحصلة تكون عادة قريبة من الصفر . ولكن يحدث من حين إلى آخر أن يكون عدد الأوجه العلوية التى تظهر عليها الصورة أو الكتابة أكبر بدرجة ملحوظة من الآخر . فى هذه الحالة تكون المحصلة كبيرة . نرى من ذلك إذن أن التأثيرات العشوائية التى تتعادل عادة لاتتعادل فى بعض الأحيان .

والحركة البروانية ظاهرة هامة فى كثير من الوجوه . فهى تحدث فى جميع الأنظمة الغروانية . ولكنها – من وجهة نظر أساسية – تزودنا بوسيلة مرئية لمشاهدة الخواص الجزيئية للغاز المثالى . وقد كانت الحركة البروانية للجسيمات الغروانية هى الوسيلة التى مكنتنا من الحصول على أول برهان مباشر للنظرية الحركية للغازات . بالإضافة إلى ذلك فإن واحدة من أولى قياسات عدد أفوجادرو قد أجريت بواسطة تجربة عملية متعلقة بحركة الجسيمات الغروانية.

١٠ – ١٠ الضغط الأوزموزى

باستخدام أفكار ومبادىء النظرية الحركية للغازات يمكننا أن نستنتج استنتاجا هاما فيما يتعلق بمخلوط غازى يتكون من غازين أو أكثر ، وقد كان دالتون أول من صاغ هذا الاستنتاج الذى يعرف بقانون دالتون للضغوط الجزئية .

قانون دالتون للضغوط الجزئية الضغط الكلى لمخلوط من الغازات المثالية يساوى مجموع الضغوط التى يسببها كل من هذه الغازات على حده .

باسلوب آخر ، لنفترض أن كميات معينة من غازات النيتروجين N_2 والأيدروجين H_2 والأكسجين O_2 قد وضعت فى وعاء حجمه V . لنفترض كذلك أن نفس الكمية من غاز النتروجين سوف تسبب ضغطا قدره P_N إذا وضعت وحدها فى نفس الوعاء . بالمثل ، لنعتبر أن P_H و P_0 هما الضغطان المعينان بنفس الطريقة لغازى الأيدروجين H_2 والأكسجين O_2 على الترتيب . إذن ، يخبرنا قانون دالتون أن الضغط الكلى لمخلوط هذه الغازات سيكون :

$$P = P_N + P_H + P_0$$

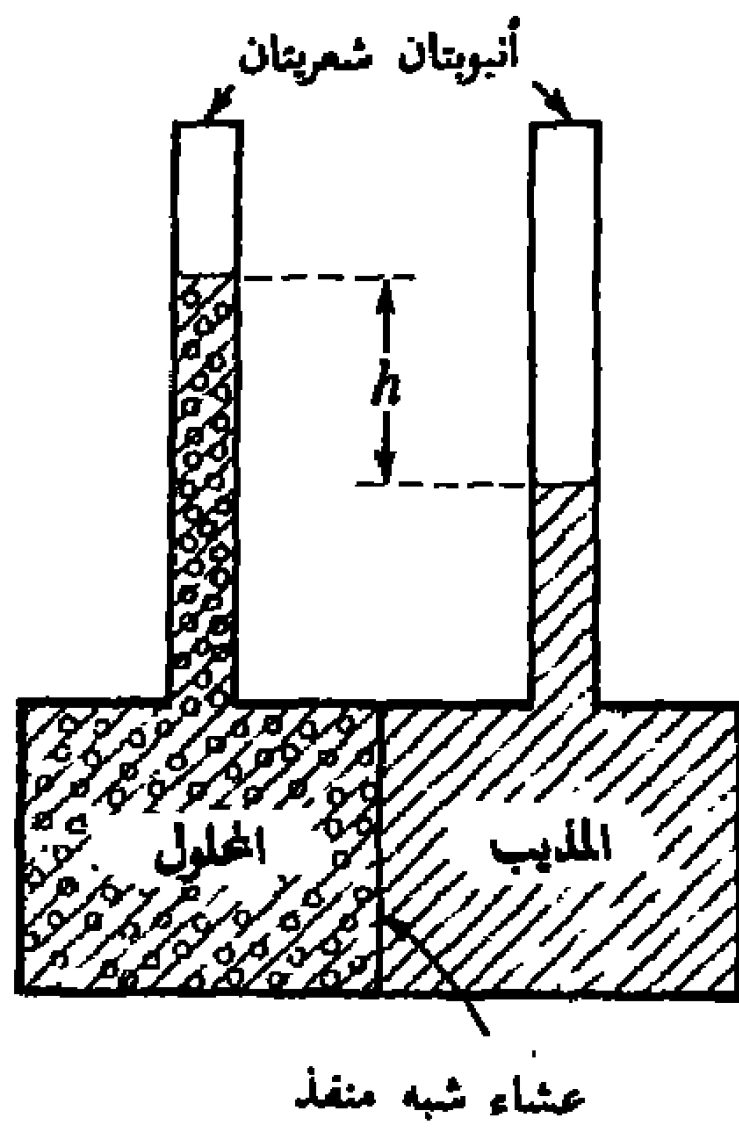
نرى من ذلك إذن أن كلا من هذه الغازات الثلاثة لايتأثر بوجود الغازين الآخرين طالما كنا نهتم بالضغط . وهذا ليس بغريب لأن قانون الغاز المثالى ينطبق على جميع الغازات المثالية عند أى ضغط . ويخبرنا هذا القانون أن $P \propto n$ ، أى أن الضغط يتناسب مع عدد الجزيئات الجرامية للغاز فى الوعاء . ويلاحظ أن القانون لايحتوى على أى كمية تعتمد على نوع الغاز المعنى ، ذلك لأن 1 mol من النتروجين N_2 مضافا ألى 1 mol من الأيدروجين H_2 فى الوعاء يعطيان نفس الضغط الذى يسببه 2 mol من أى من غازى النتروجين N_2 أو الأيدورجين H_2 . وفى الحقيقة فإن قانون الغاز المثالى يتنبأ بقانون دالتون للضغوط الجزئية .

ولكننا رأينا أيضا أن النظرية الحركية للغازات تنطبق على حركة الجسيمات الغروانية . من المتوقع ، إذن ، أن قانون الغاز المثالى يجب أن ينطبق على المحاليل الجزيئية والمحاليل الغروانية على السواء . يمكننا أن نخمن إذن أن الجزيئات المذابة لتكون محلولا مخففاً يجب أن تسلك سلوك الغاز المثالى ، وقد ثبت أن هذا صحيح ويؤدى إلى مايعرف **بالضغط الأوزموزى** . لنفحص الآن مفهوم الضغط الأوزموزى ذا النفع الكبير .

لدراسة ظاهرة الضغط الأوزموزى يمكنك إجراء تجربة بسيطة – قد تكون أجريتها بالفعل عندما كنت فى المدرسة الإعدادية أو الثانوية – باستخدام جزرة مجوفة وكمية صغيرة من الماء السكرى الملون . يحبس الماء السكرى الملون داخل الجزرة المجوفة بحيث يمكنه الارتفاع فى أنبوبة شعرية مثبتة بإحكام أعلى الجزرة . وعندما تغمر الجزرة جزئيا فى كأس به ماء نقى يشاهد سلوك غريب لافت للنظر ، إذ ينفذ بعض الماء خلال جدار الجزرة ويدخل إلى الماء السكرى . وهذا يسبب ارتفاع الماء السكرى فى الأنبوبة الشعرية . وعندما يتوقف مرور الماء خلال جدار الجزرة يلاحظ أن مستوى سطح الماء

السكرى فى الأنبوبة الشعرية أعلى كثيرا من مستوى سطح الماء فى الكأس . نستنتج من ذلك الضغط النهائى داخل الجزرة أكبر كثيرا من الماء فى الكأس ، ذلك لأن الماء الموجود فى الكأس قد تسرب من منطقة ذات ضغط منخفض إلى منطقة ذات ضغط أعلى ، وسوف نرى أن الفرق بين الضغطين داخل الجزرة وخارجها هو مايسمى الضغط الأوزموزى . وسوف نصف هنا نسخة أكثر دقة من هذه التجربة ، وهى تستخدم لقياس الكتل الجزيئية للبروتينات وجزيئات البوليمرات والجزيئات الكبيرة الأخرى . ويستخدم فى هذه التجربة الجهاز الذى سوف نصفه الآن .

يتكون الأوزمومتر من غرفتين يفصلهما غشاء شبه منفذ رقيق جدا ، كما هو مبين فى الشكل ١٠ — ٧ . فى التجربة المدرسية السابق ذكرها كانت فجوة الجزرة تمثل الغرفة الأولى ، بينما كان الكأس الذى تغمر فيه الجزرة يمثل الغرفة الثانية . أما جدار الجزرة فإنه يقوم بعمل الغشاء شبه المنفذ . وتستخدم الأوزمومترات الحديثة ألواحا رقيقة جدا من البلاستيك تنتفخ فى المذيب المستخدم لتحضير المحلول المراد قياسه ولكنها لاتذوب فيه + . ويجب أن يختار الغشاء بعناية فائقة بحيث تمر خلاله جزيئات المذيب ولاتمر خلاله جزيئات المذاب . لهذا السبب يقال أن الغشاء شبه منفذ .



شكل (١٠ — ٧)
الضغط الأوزموزى للمذاب فى المحلول المخفف جدا يساوى hdg ، حيث d كثافة المحلول أو المذيب (الكثافتان متساويتان تقريبا) .

عندما يملأ الجهاز المبين فى الشكل ١٠ — ٧ كما هو موضح ، يعدل المستويان فى الغرفتين وضعيهما ويصلان فى نهاية الأمر إلى حالة التوازن . ذلك لأن جزيئات المذيب تنفذ خلال الغشاء (إما خارجة من المحلول أو داخله فيه) ويستمر ذلك حتى يصبح ضغط المذيب واحدا على جانبى الغشاء . لاحظ جيدا أن جزيئات المذاب لاتمر خلال الغشاء شبه المنفذ . ويصل النظام إلى حالة التوازن فقط عندما يتساوى ضغط المذيب على الجانبين . لنفرض أن الضغط على الغشاء نتيجة لجزيئات المذيب هو P_s .

ولكن الضغط على الجانب الايسر من الغشاء ناتج من المذيب بالإضافة إلى جزيئات « غاز » المذاب . لنرمز إلى ضغط « غاز » المذاب هذا بالرمز π . إذن ، بتطبيق قانون دالتون نجد أن الضغط الكلى على الجانب الايسر هو :

$$\text{الضغط على الجانب الأيسر} = \pi + P_s$$

ولكن الضغط على الجانب الأيمن ناتج من المذيب النقى فقط ، وهو أيضا يساوى Ps طالما أن التوازن قد تحقق . إذن :

P_s = الضغط على الجانب الأيمن

نرى الآن أن هناك فرقا فى الضغط الكلى على جانبى الغشاء ، ويسمى هذا الفرق فى الضغط على جانبى الغشاء **الضغط الأوزموزى** ، وهو :

تعريف

$$\text{Osmotic pressure} = (\pi + P_s) - P_s = \pi$$

بتعبير آخر ، الضغط الأوزموزى هو ببساطة ضغط « غاز » المذاب فى المحلول . ويمكن قياسه باستخدام الأوزمومتر بقياس الارتفاع h فى الشكل ١٠ - ٧ . وحيث أن الضغط الأوزموزى يساوى الفرق فى الضغط ، إذن $\pi = hdg$ ، حيث d كثافة المحلول المخفف جدا . (الفرق بين كثافتى المحلول والمذيب يمكن إهماله عمليا) .

لنعد الآن إلى قانون الغاز المثالى . يعطى ضغط « غاز » المذاب بقانون الغاز المثالى بحيث يكون المحلول مخففا جدا . إذن شروط تطبيق قانون الغاز المثالى متحققة فى هذه الحالة . إذن يمكننا أن نكتب العلاقة التالية :

$$\pi V = nRT$$

حيث n عدد الجزيئات الكيلوجرامية من المذاب فى الحجم V . وإذا رمزنا للكتلة (أو الوزن) الجزيئى للمذاب بالرمز M ، فإن :

$$n = \frac{m}{M}$$

حيث m كتلة المذاب فى الحجم V

وبتبسيط معادلة « غاز » المذاب نحصل على العلاقة :

$$\pi = \left(\frac{m}{V}\right)\left(\frac{RT}{M}\right)$$

ولكن m/V هو تركيز المحلول (بالكيلوجرام لكل متر مكعب) ، لنرمز للتركيز بالرمز c . إذن :

الضغط الاوزموزى للمحلول المخفف

$$\frac{cRT}{M} = \text{الضغط الأوزموزى} = \pi \qquad (١٠ - ٥)$$

وكما نرى فإن الضغط الأوزموزى يكون كبيرا إذا كان الوزن الجزيئى للمذاب صغيرا . ولكن إذا كانت الجزيئات صغيرة جدا فسيكون من الصعب أن نجد الأغشية المناسبة التى تنفذ المذيب دون المذاب .

وهكذا يمكننا استخدام الأوزمومتر والمعادلة (١٠ – ٥) لإيجاد الوزن الجزيئى M لجزىء المذاب . بحل المعادلة بالنسبة إلى M ، نجد أن :

$$M = \frac{c}{\pi} RT$$

وعليه ، يمكن إيجاد M بقياس الضغط الأوزموزى π لمحلول معلوم التركيز c . وعمليا يجب أن يكون التركيز c صغيرا بدرجة كافية حتى تسلك جزيئات المذاب مسلك غاز مثالى. وتستخدم الأوزمومترات عادة لقياس الكتل الجزيئية للجزيئات فى المدى من حوالى 5000 إلى بضعة ملايين .

مثال توضيحى ١٠ – ١١ : الزلال أحد الجزيئات البروتينية الموجودة فى بلازما الدم . قيس الضغط الأوزموزى لمحلول مائى منه يحتوى على 0.20 g من الزلال فى كل 100 cm³ فوجد أنه يساوى 0.74 سنتيمترا من الماء عند درجة 27°C . اوجد من هذه البيانات الكتلة الجزيئية أو الوزن الجزيئى لجزىء الزلال .

طريقة الحل . يمكننا استخدام المعادلة (١٠ – ٥) لحل هذا المثال . حيث أن π هو 0.74 سنتيمترا من الماء ، فإن المعادلة :

$$\pi = hdg$$

تصبح :

$$\pi = (0.74 \times 10^{-2}\ \mathrm{m})(1000\ \mathrm{kg/m^3})(9.8\ \mathrm{m/s^2}) = 72.5\ \mathrm{N/m^2}$$

إذن ، من قانون الغاز المثالى :

$$M = \left(\frac{c}{\pi}\right) RT$$

ولكن :

$$c = \frac{0.20\ \mathrm{g}}{100\ \mathrm{cm^3}} = 2.0\ \mathrm{kg/m^3}$$

و :

$$T = 273 + 27 = 300\ \mathrm{K}$$

إذن ، بالتعويض عن القيم السابقة وعن R بالقيمة 8314 J/K نجد أن :

$$M = 69{,}000$$

وهى الكتلة الجزيئية للزلال .

ملخص .

ترتبط الطاقة الحرارية بطاقة حركة المادة . كلما كانت المادة أكثر سخونة كانت طاقة حركة جزيئاتها أكبر . تستخدم الترمومترات لقياس درجة الحرارة . هناك ثلاثة مقاييس شائعة لدرجات الحرارة . فى مقياس سلسيوس (أو المقياس المئوى) (°C) تعتبر درجة تجمد الماء 0°C ودرجة غليانه 100°C . فى مقياس كلفن (أو المقياس المطلق) (K) هاتان النقطتان هما 273.15 K و 373.15 K . فى مقياس فهرنهيت (°F) هاتان النقطتان هما 32°F و 213°F . تكافىء الدرجة الواحدة فى مقياس سلسيوس (أو كلفن) $9/5$ درجة فهرنهيت .

تتبع معظم الغازات قانون الغاز المثالى وتسمى الغازات المثالية . هذا القانون هو $PV = nRT$ ، حيث n عدد الجزيئات الجرامية الموجودة فى حجم من الغاز قدره V عند ضغط قدره P . يجب أن تكون درجة الحرارة T مقاسة على مقياس كلفن (أى المقياس المطلق لدرجات الحرارة) . ويرمز الحرف R لثابت الغاز وقيمته 8314 J/(kg mol)(K) .

الجزىء الكيلوجرامى (kg mol) من مادة هو كمية من المادة كتلتها بالكيلوجرامات تساوى عدديا الكتلة الذرية أو الجزيئية (أو الوزن الذرى أو الجزيئى) . وعموما ، يعرف الجزىء الكيلوجرامى بأنه كتلة المادة (بالكيلوجرام) التى تحتوى على عدد قدره 6.02×10^{26} من جسيمات المادة . العدد 6.02×10^{26} يسمى عدد أفوجادرو ويرمز له بالرمز N_A . يستخدم الناس عادة الجزىء الجرامى (أو مجرد جزىء (مول)) وهو يساوى $\frac{1}{1000}$ kg mol .

يمكن استخدام النظرية الحركية للغازات وقانون الغاز المثالى معا لإثبات أن درجة الحرارة المطلقة (درجة كلفن) مقياس لطاقة الحركة الانتقالية لجزيئات الغاز . وبالتحديد $T = (2N_A/3R)(\frac{1}{2}m_0v^2)$، حيث $\frac{1}{2}m_0v^2$ متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزىء الغاز . يستعاض عادة عن النسبة R/N_A بثابت بولتزمان k . إذن $\frac{1}{2}m_0v^2 = \frac{3}{2}kT$. متوسط سرعة جزىء النتروجين فى الهواء حوالى 500 m/s ، ولكن للجزيئات توزيع عريض للسرعات عند أى لحظة .

يتصرف الغاز كغاز مثالى إذا تحقق شرطان أساسيان . يجب أن يكون الغاز بعيدا عن شروط إسالته . الحجم الفعلى للجزيئات يجب أن يكون صغيرا بالمقارنة بالحجم المتاح للغاز .

يستخدم قانون الغاز المثالى لتعريف مقياس كلفن لدرجات الحرارة . عند تحقيق ذلك تعتبر النقطة الثلاثية للماء 273.16 K .

تتحرك دقائق الدخان والغبار والجسيمات الغروانية حركة متعرجة تسمى الحركة البروانية . تتبع هذه الجسيمات والدقائق قانون الغاز المثالى اذا كانت مخففة بدرجة كافية . متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل جسيم $\frac{3}{2}kT$.

ينص قانون دالتون للضغوط الجزئية على أن ضغط مخلوط من غازات مثالية يساوى مجموعة الضغوط التى يسببها كل من هذه الغازات على حدة .

يمكن أن يعزى ضغط معين لجزيئات المذاب فى المحلول لما يسمى الضغط الأوزموزى π . اذا كان المحلول مخففا بدرجة كافية فإن غاز المذاب يتبع قانون الغاز المثالى . يعطى الضغط الأوزموزى π فى هذه الحالة بالعلاقة $\pi = cRT/M$ حيث c تركيز المذاب ، M كتلته الجزيئية . هذه الحقيقة هى أساس قياس الكتل الجزيئية باستخدام الأوزمومتر .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – تعريف المقاييس الثلاثة الشائعة لدرجات الحرارة وتحديد موضع النقط الآتية على كل منها : الصفر المطلق ، نقطة الثلج ، درجة غليان الماء .

٢ – تحويل درجة الحرارة من مقياس معين الى المقياسين الشائعين الآخرين .

٣ – رسم العلاقة البيانية التى توضح تغير كل من P و V مع درجة الحرارة فى حالة الغاز المثالى . تحديد موضع الصفر المطلق على كل رسم بيانى .

٤ – كتابة قانون الغاز المثالى وتعريف كل كمية فيه . إيجاد P أو V أو n أو T للغاز المثالى عندما تكون جميع هذه الكميات معلومة عدا كمية واحدة .

٥ – تعريف الجزىء الكيلوجرامى والجزىء الجرامى . شرح العلاقة بين الجزىء الكيلوجرامى وعدد أفوجادرو . كتابة قيمة عدد أفوجادرو .

٦ – استخدام عدد أفوجادرو لإيجاد كتلة الجزىء (أو الذرة) عندما تكون الكتلة الجزيئية (أو الوزن الجزيئى) معلوما .

٧ – ذكر الشروط اللازمة لكى يتصرف غاز معين كغاز مثالى .

٨ – شرح المعنى الجزيئي لدرجة الحرارة المطلقة على أساس طاقة حركة جزيئات الغاز المثالى .

٩ – حساب متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزيئات غاز مثالى عندما تكون درجة حرارة الغاز معلومة . تخطيط رسم بيانى يوضح توزيع سرعات جزيئات الغاز عند درجتى حرارة مختلفتين .

١٠ – حل المسائل المتعلقة بقانون الغاز التى تشبه الأمثلة التوضيحية من ١٠ – ٦ إلى ١٠ – ١٠ . التفرقة بين ضغط المقياس والضغط المطلق.

١١ – شرح ماذا تعنى الحركة البروانية ولماذا تحدث .

١٢ – ذكر قانون دالتون للضغوط الجزئية ، واستخدامه لإيجاد الضغط المحصل لخليط من الغازات المثالية المختلفة .

١٣ – وصف الأوزمومتر وتوضيح ماذا يعنى بالضغط الأوزموزى عند وصفه . شرح كيف يمكن استخدام الضغط الأوزموزى لتعيين الكتل الجزيئية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

مقاييس سلسيوس وكلفن وفهرنهيت لدرجات الحرارة

غاز مثالى

جزىء جرامى (مول) وكليوجرام وجرام

عدد أفوجادرو N_A

$PV = nRT$

ضغط المقياس مقابل الضغط المطلق

طاقة الحركة الانتقالية = $\frac{3}{2}kT$

النظرية الحركية للغازات

الحركة البروانية

الضغط الأوزموزى

اسئلة وتخمينات

١ – افترض أنك كنت الشخص الوحيد الباق على قيد الحياة بعد حادث تحطم طائرة فى جزيرة صغيرة فى جنوب المحيط الهادى . وأثناء انتظارك للنجدة قررت بناء ترمومتر . كيف يمكنك تحقيق ذلك ؟

٢ – ارسم رسما بيانيا يوضح تغير ضغط غاز مثالى كدالة من $1/V$ عندما يضغط الغاز ببطء عند درجة حرارة ثابتة .

٣ – يمكننا أن نتصور جزيئات الغاز المثالى كما لو كانت كرات دقيقة فى حركة دائمة . كذلك فإن الجسيمات الغروانية تسلك سلوك الغاز المثالى . ولكن الخرز الزجاجى وكرات حمام السباحة لاتتصرف كغاز مثالى . أين يقع الخط الفاصل (فى الحجم) وإلى أى شىء يعزى ؟

٤ – حبس غازى الأيدروجين والأكسجين عند الضغط الجوى فى وعاء زجاجى قوى جدا يحتوى على قطبين كهربائيين . أطلقت شرارة بين القطبين الكهربائيين فسببت اشتعال الغازين بحيث تفاعلا حسب المعادلة $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. هل سيتغير الضغط فى الأنبوبة بعد أن تعود درجة الحرارة مرة ثانية إلى قيمتها الأصلية (200°C) ؟ اشرح . ماذا يحدث إذا كانت درجة الحرارة النهائية 20°C ؟

٥ – عند اشتقاق قانون الغاز افترضنا أن تصادمات جزيئات الغاز بالجدار تامة المرونة ، وهذا ليس فرضا صحيحا . ومع ذلك فإن هذا لايغير من الأمر شيئا طالما كانت درجة حرارة الجدران هى نفس درجة حرارة الغاز . اشرح لماذا .

٦ – قارن طاقة الوضع التثاقلية لجزىء نتروجين يوجد على ارتفاع قدره 1 m فوق سطح الأرض بطاقة حركته عندما تكون درجة الحرارة (أ) 0°C ، (ب) -270°C .

٧ – بالرغم من أن الهواء يتركب أساسا من جزيئات النتروجين N_2 ، إلا أنه يحتوى على بعض الأكسجين O_2 بالطبع . هل يتحرك هذان النوعان من الجزيئات بنفس متوسط السرعة ؟ ماهى العلاقة المضبوطة بين السرعتين ؟

٨ – علل لماذا تكون جزيئات الماء سائلا تحت الشروط العيارية بالرغم من أن غازى الأيدروجين H_2 والأكسجين O_2 لاتتكثف إلا بعد الوصول إلى درجات حرارة منخفضة جدا .

٩ – يتغير تركيب الجو عند الوصول إلى ارتفاعات كبيرة فوق الأرض . لماذا يجب أن تكون نسبة النتروجين N_2 أكبر عند الارتفاعات العالية منها عند الارتفاعات المنخفضة بالمقارنة بمحتوى الأكسجين O_2 ؟

١٠ – يحتوى كل سنتيمتر مكعب من الفضاء الخارجى على حوالى جزىء واحد . حاول أن تستنبط طريقة لقياس ضغط مثل هذا الغاز المخلخل .

١١ – باستخدام الشكل ١٠ – ٥ قدر نسبة جزيئات النتروجين التى تزيد سرعتها عن 1250 m/s عند درجتى 460 K و 1700 K .

١٢ – قدر حجم بالون مملوء بالهليوم يستطيع أن يرفع كتلة قدرها 500 kg . افترض كبداية على الأقل أن كتلة البالون داخلة فى الكتلة 500 kg . (ق)

مســائــل

اعتبر أن الضغط الجوى $1.01 \times 10^5\ N/m^2$ ($= 14.7\ lb/in^2 = 76\ cmHg = 1\ atm$)

١ – ماهما قراءتا ترمومترى سلسيوس وكلفن إذا كانت درجة الحرارة : (أ) 77°F (ب) -13°F ؟

٢ – درجة حرارة الجسم العادية 98.6°F . ماقيمة هذه الدرجة على مقياس سلسيوس ، وماقيمتها على مقياس كلفن ؟

٣ – طبقا لدليل الثوابت الفيزيائية ، درجة تجمد الزئبق -38.9°C ودرجة غليانه 357°C . حول هاتين الدرجتين إلى درجتى فهرنهيت .

٤ – أغلقت أنبوبة اختبار عند STP* . ثم سخنت إلى درجة 300°C . ماقيمة الضغط فى هذه الحالة داخل الأنبوبة بالضغط الجوى والنيوتن لكل متر مربع والسنتيمتر من الزئبق والباوند لكل بوصة مربعة ؟

٥ – خزان مغلق حجمه $30\ ft^3$ متصل بمقياس ضغط قراءته $100\ lb/in^2$. رفعت درجة حرارة الخزان بعد ذلك من 27°C إلى درجة أعلى مجهولة . (أ) ماهى درجة الحرارة الجديدة إذا كانت قراءة المقياس $140\ lb/in^2$ ؟ (ب) ماقيمة الضغط النهائى فى الخزان بالضغط الجوى ؟

٦ – خزان حجمه $20.000\ cm^3$ به أكسجين مضغوط عند ضغط مقياس قدره $1500\ lb/in^2$. ماهو الحجم الذى يشغله هذا الغاز عند الضغط الجوى ونفس درجة الحرارة ؟

٧ – ضغط الهواء الموجود فى غرفة عند درجة 27°C والضغط الجوى فجأة إلى حجم قدره 1/20 من حجمه الأصلى وضغط قدره 30 atm . ماهى درجة حرارة الغاز ؟

٨ – تمدد غاز ضغطه المطلق $1000\ lb/in^2$ ودرجة حرارته 27°C فجأة فى غرفة حجمها 10 أضعاف الحجم الأصلى . ماقيمة الضغط الجديد للغاز بعد دقائق قليلة إذا وجد أن درجة حرارته -3°C فى تلك اللحظة ؟

٩* – فقاعة هوائية حجمها $0.23\ cm^3$ موجودة على قاع بحيرة عمقها 30 ft . أوجد حجمها قبل أن تصل إلى السطح مباشرة . افترض أن درجة الحرارة عند القاع 7°C وعند السطح 17°C .

١٠ – الوزن الجزيئى لجزىء البولى ايثيلين فى قطعة من البولى ايثيلين هو حوالى 25,000 . اوجد كتلة هذا الجزىء . البولى ايثيلين قريبة من $0.95 g/cm^3$. ماعدد هذه الجزيئات الموجودة فى (أ) 1 g من البولى ايثيلين (ب) $1\ cm^3$ من البولى ايثيلين

١١ – كثافة البنزين $879\ kg/m^3$ ووزنه الجزيئى 78 . اوجد (أ) كتلة جزىء البنزين ، (ب) عدد جزيئات البنزين فى $1\ cm^3$.

---

* هى الحروف الأولى من العبارة «Standard temperature and pressure»
أى درجة الحرارة والضغط العياريين ، وهما 0°C ، 1 atm .

١٢ – خزان حجمه $2000\ cm^3$ مملوء بغاز النتروجين عند ضغط مقياس قدره 100 atm . (أ) ماعدد الجزيئات الكيلوجرامية من النتروجين الموجودة فى الخزان ؟ (ب) ماعدد الكيلوجرامات من النتروجين الموجودة فى الخزان ؟
اعتبر أن درجة الحرارة 20°C وأن الوزن الجزيئى للنتروجين N_2 هو 28 .

١٣ – يعتبر الضغط 1×10^{-6} mmHg تفريغا جيدا فى كثير من التطبيقات . (أ) اوجد عدد الجزيئات الكيلوجرامية من النتروجين فى $1\ cm^3$ عند هذا الضغط . (ب) ماعدد جزيئات النتروجين الموجودة فى $1\ cm^3$ عند هذا الضغط ؟ افترض أن الهواء نتروجين نقى عند درجة حرارة الغرفة (فى الحقيقة يمثل النتروجين حوالى 78% من الهواء) .

١٤ – الحجم الفعلى لجزىء النتروجين هو حوالى $8 \times 10^{-30}\ m^3$. أوجد كسر الحجم الذى تحتله جزيئات غاز النتروجين بالفعل عند STP .

١٥ – وضعت قطعة من الثلج الجاف ، CO_2 ، فى أنبوبة اختبار ثم أغلقت ،فإذا كان وزن الثلج الجاف 0.48 g . وحجم إنبوبة الاختبار المغلقة $20\ cm^3$ ، ماهو الضغط النهائى فى الأنبوبة إذا تبخر الثلج الجاف تماما ووصل إلى حالة التوازن الحرارى مع الجو المحيط عند درجة 27°C ؟(الوزن الجزيئى للثلج الجاف CO_2 هو 44) .

١٦ – عندما أغلقت أنبوبة اختبار حجمها $20\ cm^3$ بإحكام عند درجة حرارة منخفضة جدا ، تكثفت بعض قطرات النتروجين السائل فى الأنبوبة من الهواء (درجة غليان النتروجين -210°C) . ماذا يكون ضغط النتروجين فى الأنبوبة عندما تسخن الأنبوبة إلى درجة 27°C إذا كان « وزن » القطرات 0.14 g ؟

١٧ – يراد حرق الأيدروجين فى الأكسجين للحصول على 18.0 g من الماء . ماحجم الأيدروجين اللازم لذلك عند STP ؟ (الوزن الجزيئى للماء H_2O هو $18 = 16 + 2$) .

١٨ – أسطوانة مغلقة تحتوى على كباس متحرك معزول يقسم الاسطوانة إلى جزءين . اذا وضعت كتلتان متساويتان من نفس الغاز فى كل من جانبى الأسطوانة ، اثبت أن الكباس يتخذ موضعا محددا بحيث $V_2 = V_1(T_2/T_1)$ ، حيث V_1 و T_1 هما الحجم ودرجة الحرارة على أحد جانبى الكباس و V_2 و T_2 هما الحجم ودرجة الحرارة على الجانب الآخر من الكباس .

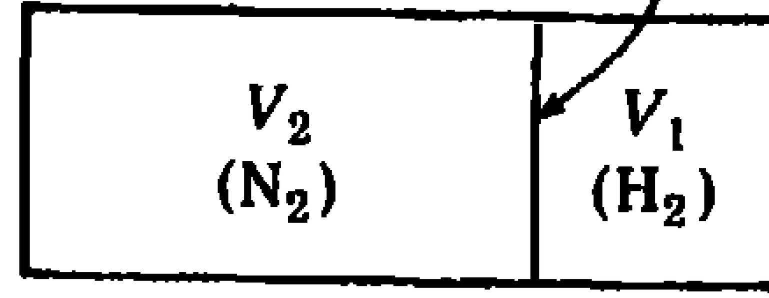
١٩* – الفضاء الخارجى يتكون أساسا من ذرات ايدروجين منفردة ودرجة حرارته حوالى 3 k . وفى المتوسط هناك واحد من هذه الذرات فى كل سنتيمتر مكعب . (أ) اوجد ضغط هذا الغاز فى الفضاء الخارجى ، وعبر عن إجابتك بالضغط الجوى . (ب) اوجد متوسط طاقة حركة واحدة من ذرات الأيدروجين . (جـ) ماهى سرعة ذرة بهذه الطاقة ؟ (الوزن الذرى لذرة الأيدروجين 1) .

٢٠ – درجة الحرارة داخل الشمس تساوى تقريبا درجة حرارة القنبلة الذرية ، أى حوالى 10^8 k . اوجد متوسط طاقة الحركة الانتقالية للبروتون (نواة الأيدروجين) عند هذه الدرجة واحسب منها متوسط سرعته (الكتلة الذرية لذرة الأيدروجين 1 ، وبتقريب جيد يمكن اعتبار أن الكتلة الذرية للبروتون هى أيضا 1) .

٢١ – كثافة الهواء الجاف عند STP هى $1.29\ kg/m^3$ ، وتركيبه (الوزنى) كالتالى : 78% نتروجين N_2 ، 21% أكسجين O_2 ، 0.9% أرجون زائد آثار من ثانى أكسيد الكربون CO_2 والهليوم والغازات الأخرى . (أ) اوجد ضغط كل من المركبات الثلاث الرئيسية باستخدام قانون الغاز . (ب) استخدام قانون دالتون لإيجاد ضغط الهواء عند STP . (الوزن الجزيئى لغاز الأرجون 40 وهو يساوى الكتلة الذرية لأن الغاز أحادى الذرة) .

٢٢ – اوجد الضغط الأوزموزى لمحلول مائى من السكر تركيزه 2 g لكل $100\ cm^3$. الوزن الجزيئى للسكر 342 . افترض أن درجة الحرارة 27°C . عبر عن إجابتك بالسنتيمترات من الماء .

٢٣ – حضر محلول بإذابة 0.250 g من البوليستيرين فى البنزين للحصول عى $100\ cm^3$ من المحلول . قيس الضغط الأوزموزى للمحلول عند 20°C فوجد أنه يساوى 1.67 cm من البنزين . اوجد الوزن الجزيئى للبوليستيرين . (كثافة البنزين عند درجة 20°C تساوى $879\ kg/m^3$) .



شكل م١٠ – ١

٢٤* – يفصل لوح رقيق من البلاستيك بين وعاءين كما هو مبين فى الشكل م ١٠ – ١ . ويحتوى الحجم 1 على غاز الأيدروجين H_2 عند STP ، بينما يحتوى V_2 على غاز النتروجين N_2 عند STP . معلوم أيضا أن $V_2 = 2V_1$. ثقب الآن ثقب فى البلاستيك . ماهو الضغط النهائى بعد الوصول إلى حالة التوازن ؟ كرر العمل اذا كان ضغط غاز الأيدروجين H_2 هو 240 cmHg وضغط غاز النتروجين هو 60 cmHg .

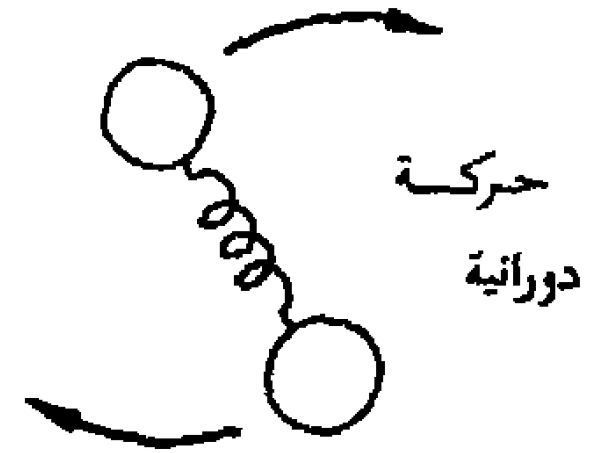
الفصـــل الحــادى عشــر

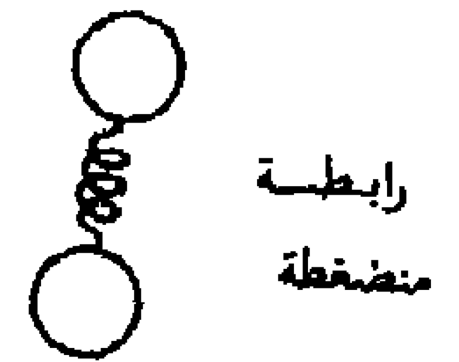
الخواص الحرارية للمادة

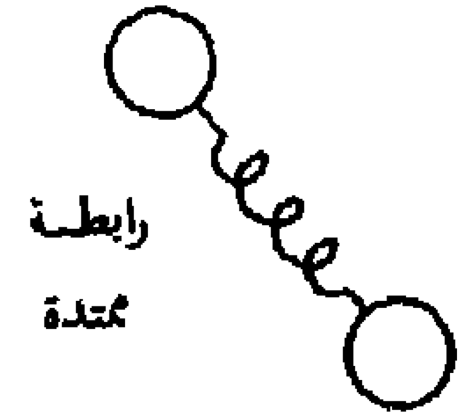
عندما تبرد المادة فإنها تفقد طاقة حرارية . ماهى الكيفية التى تترك بها الطاقة الحرارية المادة ؟ ماتأثير فقد الطاقة الحرارية على ذرات المادة ؟ ماهى كمية الطاقة الحرارية التى تفقدها ؟ سنناقش إجابات هذه الأسئلة فى هذا الفصل . بالإضافة إلى ذلك فإننا سنتعرض بالدراسة لبعض المواضيع الأخرى كغليان وتجمد السوائل وطرق انتقال الحرارة . وسوف تساعدنا المعلومات التى سوف نكتسبها من دراسة هذه الموضوعات على تعميق فهمنا لطبيعة الحرارة وكذلك سلوك الذرات والجزيئات فى المادة .

١١ – ١ الطاقة الحرارية والطاقة الداخلية

رأينا فى الفصل السابق أن درجة الحرارة المطلقة لغاز مثالى لها معنى سهل الفهم : فمتوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزىء الغاز هو $\frac{3}{2}kT$ ، حيث k ثابت بولتزمان . نستنتج من ذلك أن متوسط طاقة حركة جزىء فى غاز ساخن أكبر منها فى الغاز البارد . ومع ذلك فإن معظم أنواع جزيئات الغاز لها طاقة أخرى بالإضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية . فالجزىء ثنائى الذرة ، مثلا ، كجزىء النتروجين N_2 أو الاكسجين O_2 له طاقة حركة دورانية بالإضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية . ويمثل الشكل (١١ – ١) رسما تخطيطيا لأحد هذه الجزيئات . وفى كثير من الأحيان يعتبر الجزىء مكونا من كرتين متصلتين بواسطة زنبرك . وعادة يتشوه هذا الزنبرك – الذى يمثل الرابطة الكيميائية بين الذرتين – عندما تتصادم الجزيئات بعضها ببعض . نتيجة لذلك قد ينضغط الزنبرك أو يمتد ، وفى كلتا الحالتين تختزن الطاقة فى الزنبرك المشوه الموجود بين الذرتين اللتين تكونان الجزىء . نرى من ذلك أنه حتى الجزىء البسيط ثنائى الذرة يختزن طاقة كبيرة بالاضافة إلى طاقة حركته الانتقالية .







شكل (١١ – ١)
لجزىء الغاز طاقة دورانية بالإضافة إلى طاقة الحركة الانتقالية ، وله أيضا طاقة مرتبطة بالرابطة الزنبركية بين ذراته .

ويصبح الموقف أكثر صعوبة عندما ننتقل إلى الجزيئات ذات التركيب الأكثر تعقيدا . ذلك لأن كل جزىء يحتوى على عديد من الروابط الزنبركية . وعليه فإن الجزيئات تستطيع أن تختزن كمية أكبر من الطاقة فى روابطها المشوهة . وتنطبق النظرية الحركية على الغاز المثالى المكون من مثل هذه الجزيئات المعقدة أيضا . وهكذا فإن طاقة الحركة الانتقالية لهذه الجزيئات تعطى كذلك بالكمية $\frac{3}{2}kT$ ، ولكن كل جزىء يملك طاقة كبيرة بالإضافة إلى ذلك .

عند تصادم جزيئات الغاز بعضها ببعض توزع طاقة الغاز بين طاقة الحركة الانتقالية وطاقة الحركة الدورانية والطاقة المرتبطة « بالزنبركات » بين الذرات . ونحن نعلم أن طاقة الحركة الانتقالية تتناسب مع درجة الحرارة المطلقة للغاز T . وأيضا تزداد الطاقة الدورانية والطاقة الاهتزازية (المرتبطة بالزنبركات) بزيادة T . أى أن T مقياس للطاقة الكلية لجزيئات الغاز . وفى الحقيقة فإن مقررات الميكانيكا الإحصائية تثبت أن الطاقة الكلية تتناسب مع T بشرط ألا تكون درجة الحرارة منخفضة جدا* .

---

* هذا الشرط ، وهو أن درجة الحرارة لايجب أن تكون منخفضة جدا ، له معنى عميق . وفى الحقيقة يمثل فشل النظرية الحركية فى تفسير سلوك الغازات عند درجات الحرارة المنخفضة لغزا عويصا للفيزيائيين ؛ وقد ظلت أسباب هذه التناقضات مجهولة إلى أن أمكن تفسيرها على أساس مبادىء ميكانيكا الكم . وسوف نبحث ذلك بتوسع فى الفصل السادس والعشرين .

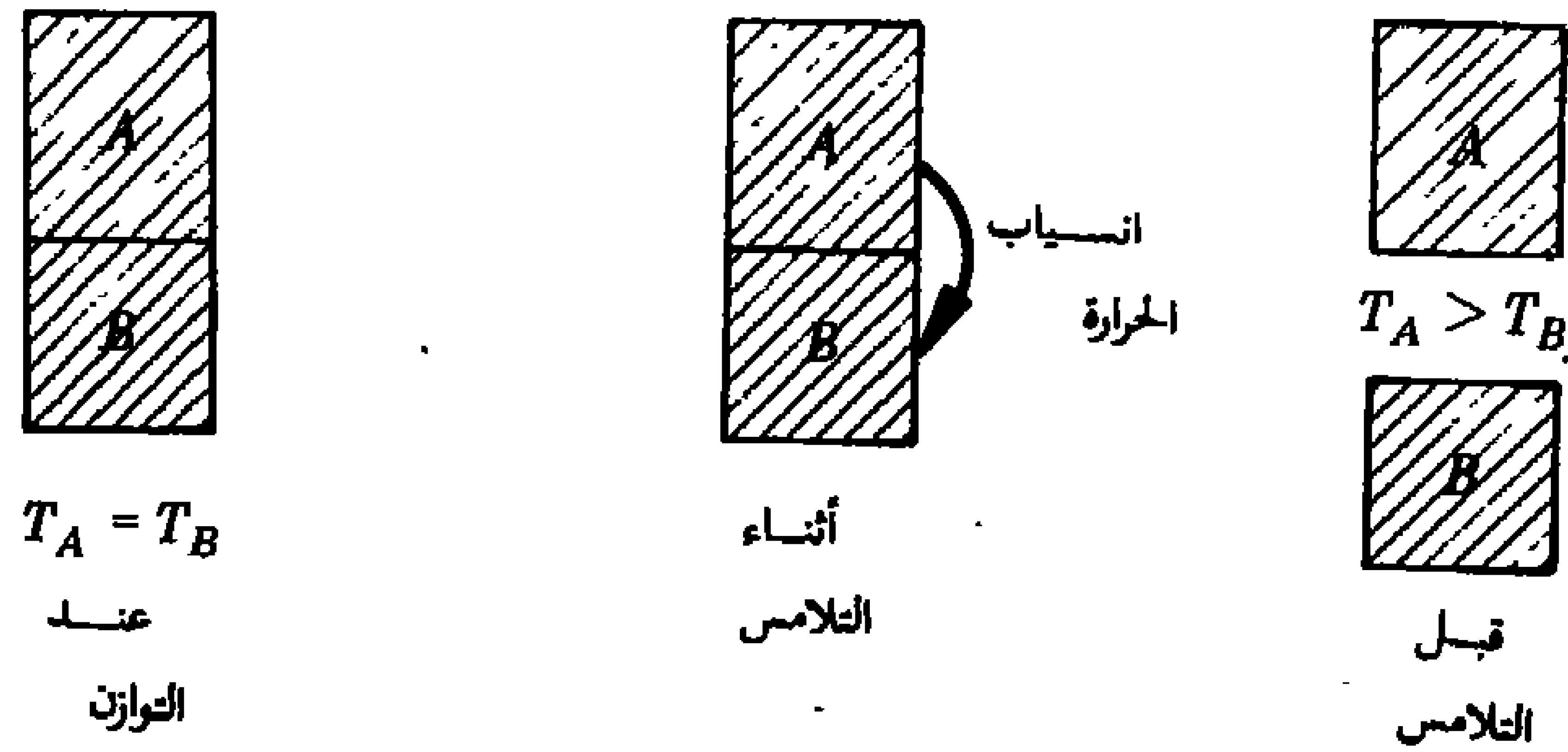
وتنطبق نفس الأفكار على السوائل والجوامد . فالسائل يشبه كثيرا الغاز المضغوط جدا . وبالرغم من أن الجزيئات متقاربة جدا من بعضها البعض بحيث لايمكنها أن تتصرف كغاز مثالى ، فلازال صحيحا أن T مقياس للطاقة الجزيئية للسائل . كذلك يمكن اعتبار قطعة من المادة الصلبة كجزىء معقد جدا . وبالرغم من أن تعقيد هذا « الجزىء » كبيرا جدا ، فلازالت هناك طاقة مرتبطة بالروابط الزنبركية بين ذراته . وهذه الطاقة تزداد أيضا بزيادة درجة الحرارة .

وكما نرى فإن الطاقة المرتبطة بالحركة العشوائية للجزيئات والذرات تزداد مع T فى جميع صور المادة . وتسمى هذه الطاقة المرتبطة بالحركة العشوائية للذرات والجزيئات عادة **الطاقة الحرارية** .

تعريف الطاقة الداخلية

تعرف **الطاقة الداخلية** U لمادة كمايلى : مجموع جميع أنواع الطاقة التى تملكها الذرات أو الجسيمات الأخرى المكونة للمادة يسمى **الطاقة الداخلية** للمادة وكما نرى فإن الطاقة الداخلية U تتضمن طاقتى الحركة والوضع والطاقة الكيميائية والكهربائية والنووية وجميع الصور الأخرى من الطاقة التى تمتلكها جزيئات المادة .

لتعريف الكمية المسماة بالطاقة الحرارية يجب أولا أن ندرس مايحدث عند تلامس مادتين مختلفتين فى درجة الحرارة ، ويمثل الشكل (١١ - ٢) هذا الموقف . إذا كانت درجة حرارة الجسم A أعلى من درجة حرارة الجسم B ، وإذا كان الجسمان مكونين من نفس المادة ، فإن متوسط طاقة الجزىء الواحد فى A ستكون أكبر من متوسط طاقة الجزىء الواحد فى B . نتيجة لذلك ، عند وضع الجسمين فى حالة تلامس تفقد الجزيئات فى A كمية من الطاقة تكتسبها الجزيئات فى B . ولذلك فإن A يبرد و B يسخن .



شكل (١١ - ٢)
تنساب الطاقة الحرارية من الجسم الساخن إلى الجسم الأبرد حتى تصبح درجتا حرارتيهما متساويتين .

تعريف

الطاقة التى تنتقل من جسم ذى درجة حرارة عالية إلى جسم ذى درجة حرارة منخفضة نتيجة لفرق درجتى الحرارة تسمى الطاقة الحرارية ، وتمثل

بالرمز ΔQ . وتبين التجربة العملية أن انسياب الطاقة الحرارية يتوقف عندما تصبح درجتا حرارة الجسمين متساويتين . وهذا صحيح حتى إذا كان الجسمان مصنوعين من مادتين مختلفتين . ويستنتج من ذلك أن :

الطاقة الحرارية. الطاقة الحرارية تنساب تلقائيا من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الأبرد وليس العكس .

فى الجزء التالى سنعرف الوحدات العملية التى تقاس بها الطاقة الحرارية .

١١ - ٢ وحدات الطاقة الحرارية :

ثبت تاريخيا أن استخدام الطاقة الحرارية قد سبق فهمنا لطبيعة الحرارة بزمن بعيد . بناء على ذلك كانت الحرارة تقاس بطريقة عملية بحتة ، وقد اختيرت وحداتها نظرا لفائدتها . وحيث أن الماء يدخل فى معظم استخدامات الإنسان للحرارة ، فليس من الغريب أن تختار كمية الحرارة ووحداتها بدلالة تجربة مرتبطة بالماء .

وحدات الحرارة الوحدتان الشائعتان لكمية الحرارة هما **السعر (cal)** و**الوحدة الحرارية البريطانية (Btu)** ، وتعرفان اليوم كمايلى :

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

و :

$$1 \text{ Btu} = 1054 \text{ J}$$

ويتفق هذان التعريفان مع التعريفين الأصليين لهاتين الوحدتين ، وهما كالتالى : السعر هو كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء من 14.5°C إلى 15.5°C ، و *Btu* هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء من 63°F إلى 64°F . من أى من هذين التعريفين نجد أن :

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$$

ويستخدم المتخصصون فى التغذية وحدة أخرى للطاقة الحرارية ، وهى تسمى أيضا السعر ، ولكن من الأنسب أن يسمى الكيلوكالورى (أو السعر الكبير) لأن

$$1 \text{ nutritionist's calorie} = 1000 \text{ cal}$$

فمثلا ، عندما يخبرنا عالم الصحة أن وجبتنا اليومية يجب أن تحتوى على حوالى 2000 cal من طاقة الطعام فإنه يعنى 2000 kcal .

١١ - ٣ السعة الحرارية النوعية :

لكى نرفع درجة حرارة جسم ما يجب أن نزيد الطاقة الحرارية لجزيئاته . ويمكننا تحقيق ذلك بالسماح للحرارة بالانتقال إلى الجسم من جسم آخر أكثر سخونة . بالمثل ، إذا أردنا تبريد جسم يمكننا تحقيق ذلك بالسماح للطاقة الحرارية بالانسياب من هذا الجسم إلى جسم آخر أبرد . ولكى نستطيع وصف تلك العمليات يجب أن نعلم كمية الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة الجسم . **كمية الحرارة التى يجب أن تنساب إلى أو من وحدة الكتل من المادة لتغير درجة حرارته بمقدار درجة واحدة تسمى السعة الحرارية النوعية للمادة .** **تعريف**

يرمز للسعة الحرارية النوعية بالرمز c ، ويمكن كتابة تعريفه فى صورة معادلة . عندما تنساب كمية من الحرارة ΔQ إلى كتلة من المادة قدرها m فإن درجة حرارتها سوف تزداد بمقدار ΔT . إذن ، من التعريف :

السعة الحرارية النوعية

$$\text{السعة الحرارية النوعية} = c = \frac{\Delta Q}{m\,\Delta T}$$

ومنه نجد أن :

$$\Delta Q = cm\,\Delta T \qquad (١ - ١١)$$

ووحدات c هى السعر لكل جرام لكل درجة سلسيوس . ويستخدم تعريف مشابه للكمية c فى النظام البريطانى للوحدات ، ولكن فى هذه الحالة يؤخذ 1 lb من المادة ويقاس تغير درجة الحرارة بالدرجات الفهرنهيتية . ووحدات c فى النظام البريطانى هى و .ح .ب (Btu) لكل باوند لكل درجة فهرنهيتية .

ونظرا لاختلاف تركيب المواد فإن كل مادة لها سعة حرارية نوعية معينة . بالإضافة إلى ذلك فإن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة المادة درجة واحدة ، تتغير قليلا مع درجة الحرارة . عادة يكون هذا التغير طفيفا فى مدى محدود من درجات الحرارة ، ولذلك فانه يهمل عادة . ويمثل الجدولان (١١ - ١) و (١١ - ٢) قيم c لكثير من المواد . لاحظ أن القيم المعطاه تنطبق على كل من الوحدات سعر لكل جرام لكل درجة سلسيوس و و .ح .ب لكل باوند لكل درجة فهرنهيتية . هل يمكنك أن تثبت لماذا يجب أن تكون القيمتان متساويتين باستخدام تعريف c ؟

مثال توضيحى ١١ - ١ : ماهى كمية الحرارة المنطلقة عندما يبرد 20 g من الماء من درجة 90°C إلى 30°C ؟

طريقة الحل : السعة الحرارية النوعية للماء هى 1.00 cal/(g)(°C) . فى هذه الحالة $\Delta T = -60°C$ ، إذن ، من المعادلة (١١ – ١) نجد أن :

$$\Delta Q = cm\,\Delta T = [1.00\ \text{cal/(g)(°C)}](20\ \text{g})(-60°\text{C}) = -1200\ \text{cal}$$

وتبين لنا الإشارة السالبة أن هذه الكمية من الحرارة مفقودة .

جدول (١١ – ١)

السعة الحرارية النوعية لبعض المواد مقاسة بالوحدات

cal/(g)(°C) أو Btu/(lb)(°F) .

ماء	1.000	المنيوم	0.21
الجسم الآدمى	0.83	زجاج	0.1-0.2
كحول ايثيلى (ايثانول)	0.55	حديد	0.11
بارافين	0.51	نحاس	0.093
ثلج	0.50	زئبق	0.033
بخار الماء	0.46	رصاص	0.031

جدول (١١ – ٢)

السعة الحرارية النوعية لبعض الغازات عند درجة 15°C

مقاسة بالوحدات cal/(g)(°C) أو Btu/(lb)(°F)

الغاز	c_V	c_p	$\gamma = c_p/c_V$
He	0.75	1.25	1.66
Ar	0.075	0.125	1.67
O_2	0.155	0.218	1.40
N_2	0.177	0.248	1.40
CO_2	0.153	0.199	1.30
H_2O (200°C)	0.359	0.471	1.31
CH_4	0.405	0.53	1.31

مثال توضيحى ١١ – ٢ : يحتوى ابريق ترموس على 300 g من القهوة (ماء أساسا) عند درجة 90°C . صب فى هذا الابريق 50 g من اللبن (ماء أساسا أيضا) عند درجة حرارة 15°C . ماهى درجة الحرارة النهائية للقهوة ؟

طريقة الحل : ابريق الترموس معزول جيدا ، ولذلك فإننا سوف نفترض عدم تسرب أى حرارة من القهوة إليه . وعليه فإن الحرارة التى تفقدها القهوة تستغل كلية فى تدفئة اللبن . ويخبرنا قانون بقاء الطاقة أن :

الطاقة المكتسبة بواسطة اللبن = الطاقة المفقودة بواسطة القهوة

باستخدام المعادلة (١١ – ١) يمكننا كتابة هذه المعادلة كالتالى :

$$(cm\,|\Delta T|)_{\text{coffee}} = (cm\,|\Delta T|)_{\text{milk}}$$

فى هذه الحالة $c = 1.00$ cal/(g)(°C) ، وكتلة القهوة 300 g وكتلة اللبن 50 g . فإذا رمزنا لدرجة الحرارة النهائية لمحلول القهوة والماء بالرمز t فإن ΔT ستكون t - 90°C للقهوة بينما ستكون t-15°C للبن . لاحظ أننا نريد أن تكون ΔT عددا موجبا ، لذلك فإننا كتبناها t-90°C وليس t-90°C . باستخدام هذه القيم نحصل من المعادلة السابقة على التالى :

$$t = 79.3\,°\text{C}$$

أى أن اللبن قد برد القهوة بمقدار 10.7°C .

مثال توضيحى ١١ — ٣ : وعاء معزول من الالمنيوم « وزنه » 20 g يحتوى على 150 g من الماء عند درجة 20°C . سخنت قطعة من المعدن كتلتها 30 g إلى درجة 100°C ثم أسقطت فى الماء . فإذا كانت درجة الحرارة النهائية للماء والعلبة والمعدن هى 25°C ، اوجد السعة الحرارية النوعية للمعدن .

طريقة الحل : لاحظ فى هذه الحالة أن كلا الوعاء والماء يكتسبان حرارة . ولهذا فإن قانون بقاء الطاقة يسمح لنا بكتابة المعادلة الآتية :

الحرارة المفقودة بواسطة المعدن = الحرارة المكتسبة بواسطة الماء + الحرارة المكتسبة بواسطة العلبة .

وهذه الكميات هى كمايلى :

الكسب الحرارى للعلبة = $[0.21\text{ cal/(g)(°C)}](20\text{ g})(5\,°\text{C})$

الكسب الحرارى للماء = $[1.00\text{ cal/(g)(°C)}](150\text{ g})(5\,°\text{C})$

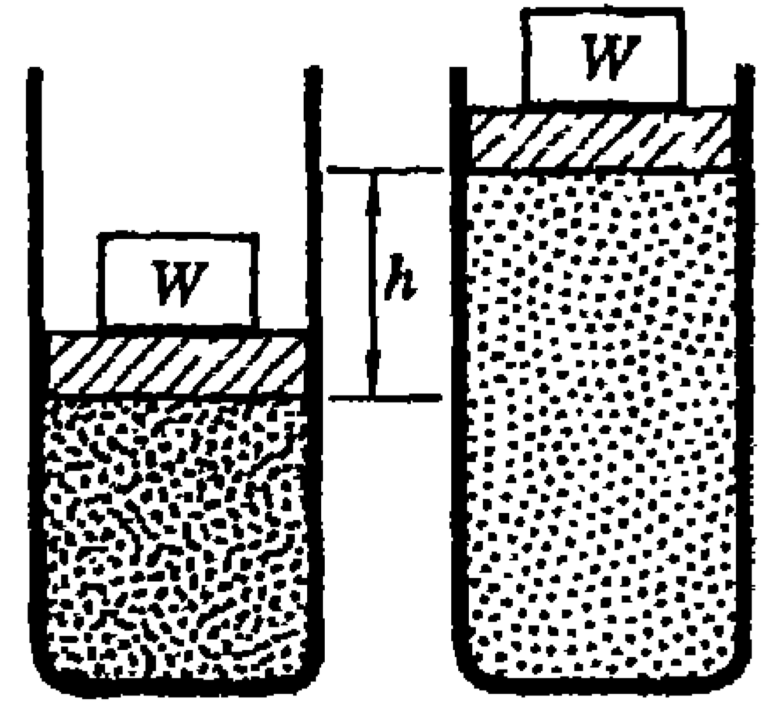
الفقد الحرارى للمعدن = $c_x(30\text{ g})(75\,°\text{C})$

بالتعويض عن هذه الكميات فى المعادلة السابقة نجد أن $c_x = 0.34\text{ cal/(g)(°C)}$

١١ — ٤ c_V و c_P للغازات

سجلنا فى الجدول (١١ — ٢) قيمتين للسعة الحرارية النوعية للغازات وهما c_P و c_V . ويبين الدليل السفلى لهاتين الكميتين ماإذا كان ضغط الغاز أو حجمه قد ظل ثابتا أثناء القياس . وسوف تلاحظ من الجدول أن السعة الحرارية تحت حجم ثابت c_V أقل من الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت c_P . ويمكن فهم السبب فى ذلك بسهولة من الاعتبارات التالية .

عند تسخين غاز فى وعاء ثابت الحجم تظهر الطاقة الحرارية المضافة إلى الغاز بأكملها كطاقة إضافية لجزيئات الغاز ، أى أنها تستغل بأكملها فى رفع درجة حرارة الغاز . ولكن الحال ليست كذلك إذا كان الغاز يتمدد أثناء تسخينه . ويمكننا فهم ذلك بالرجوع إلى الشكل (١١ – ٣) . يمثل هذا الشكل كمية من الغاز فى وعاء مغلق من أعلى بواسطة كباس يحمل ثقلا ، ويمارس هذا الكباس ضغطا ثابتا على الغاز . فإذا أضيفت الحرارة إلى الغاز فإنه سوف يتمدد رافعا الكباس . ومع ذلك فإن ضغط الغاز ، وهو يساوى الضغط المطبق بواسطة الكباس ، يظل ثابتا أثناء تمدد الغاز . ولكن الغاز يبذل شغلا أثناء رفع الكباس ، وهذا الشغل يبذل على حساب الطاقة الحرارية التى تنساب إلى الغاز . وعليه فإن الحرارة المضافة إلى الغاز لاتستغل بأكملها فى تسخين الغاز ، ولكن جزءا منها يستهلك فى بذل الشغل اللازم لكى يرفع الغاز الكباس .



شكل (١١ – ٣)
عند تسخين الغاز فى الغرفة يرتفع الكباس ويظل الضغط ثابتا . ومن ثم فإن الطاقة الحرارية يجب أن تبذل شغلا فى رفع الكباس وكذلك فى تسخين الغاز .

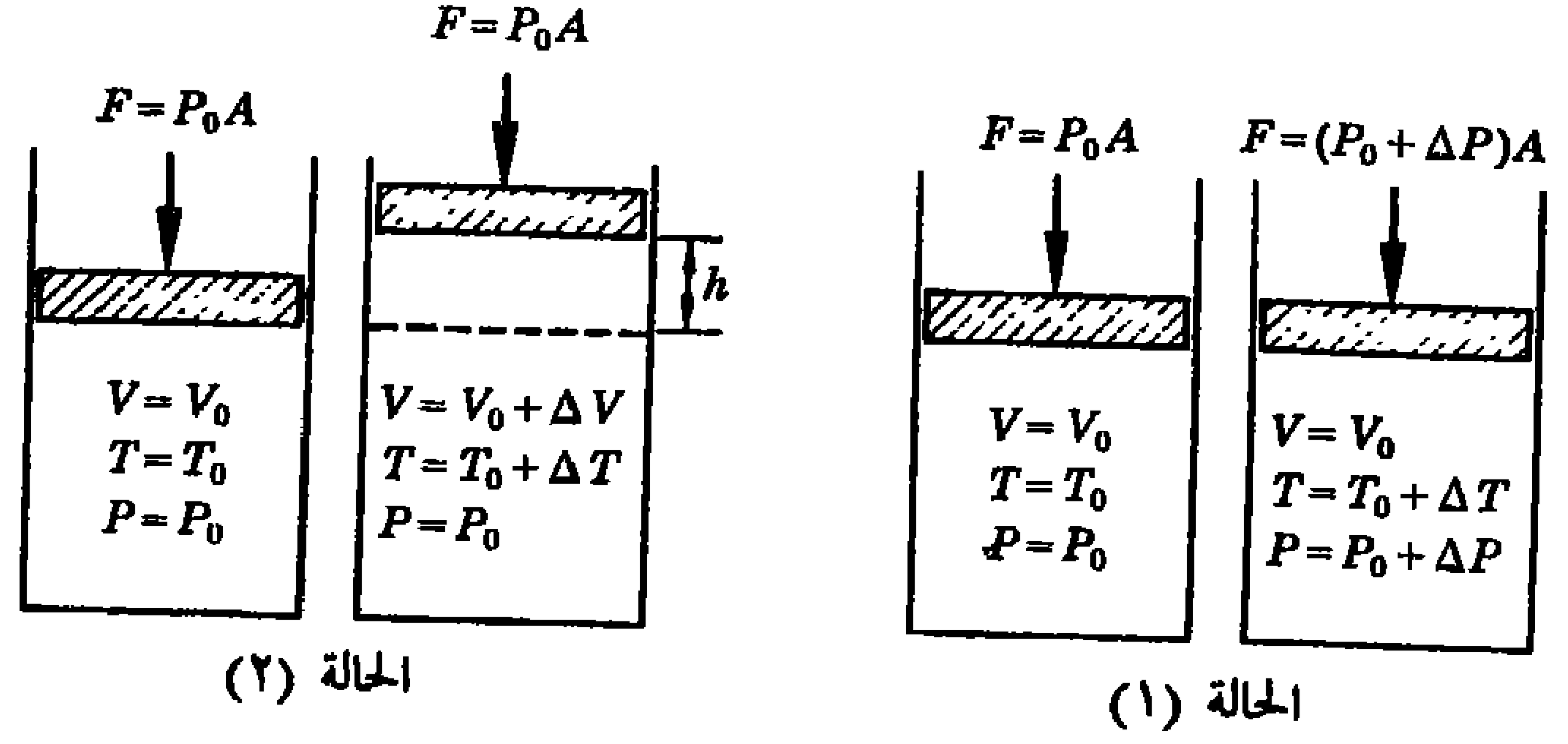
نرى من ذلك أن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز بمقدار معين تحت ضغط ثابت أكبر من كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارته بنفس المقدار تحت حجم ثابت . ففى الحالة الأولى يستغل بعض الطاقة الحرارية فى بذل الشغل ، لذلك فإن c_V أصغر من c_p . والفرق بين هاتين القيمتين يساوى الشغل المبذول على الكباس عندما ترتفع درجة حرارة وحدة الكتل من الغاز درجة واحدة تحت ضغط ثابت .

وسوف نرى من الملحوظة الخاصة المذكورة فى صفحة ٢٥٤ أن قيمة C_p-c_V للغاز المثالى تساوى R/M ، حيث R ثابت الغاز ، M الوزن الجزيئى للغاز

١١ – ٥ حرارة التبخير وغليان السوائل

رأينا مما سبق أن الطاقة الداخلية للمادة تزداد عند إضافة الطاقة الحرارية إلى المادة ، وتصاحب هذه الزيادة فى الطاقة الداخلية عادة بزيادة فى درجة الحرارة . ومع ذلك ، فإن درجة الحرارة لاتزداد دائما بالرغم من زيادة الطاقة الداخلية للمادة . فعند درجة الحرارة التى يحدث فيها تغير الطور فى المادة تظل درجة الحرارة ثابتة حتى ينتهى تغير الطور تماما . فمثلا ، يحدث تغير الطور عند درجة انصهار المواد البلورية أو درجة غليان السوائل . ففى الحالة الأولى يتحول الطور البللورى إلى طور السيولة ، وفى الحالة الثانية يتحول طور السيولة إلى طور البخار . وبالرغم من أن الحرارة يجب أن تضاف لكى يتم تغير الطور ، فإن درجة حرارة المادة لاترتفع

عندما تتحول مادة من طور إلى آخر تتغير طاقتها الداخلية . فالطاقة الداخلية لجزيئات الماء فى بخار الماء أكبر من طاقتها الداخلية بعد أن تتكثف . كذلك فإن الطاقة الداخلية لجزيئات الماء فى الثلج أقل منها فى الماء السائل . لندرس الآن مايحدث عندما يتغير طور المادة ، وسنبدأ دراستنا بمناقشة تغير الطور من طور السيولة إلى طور البخار .



الحالة (١)   الحالة (٢)

الكمية $c_P - c_V$ للغاز المثالى

تعتمد كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غاز بمقدار ΔT على طريقة تسخين الغاز . وهناك حالتان حديتان هامتان : (١) تسخين الغاز فى وعاء ثابت الحجم ، (٢) تسخين الغاز فى وعاء يتغير حجمه بحيث يظل الضغط ثابتا ؛ وهذان البديلان موضحان فى الشكل . لندرس الآن هذين الموقفين لإيجاد الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة الحرارة بنفس المقدار ΔT فى كل حالة .

عندما يزود الغاز المثالى بالطاقة الحرارية قد تكتسب الجزيئات هذه الطاقة كطاقة داخلية . وفى بعض الحالات يستهلك جزء من الطاقة الحرارية فى بذل الشغل ضد القوى التى تحدد الغاز . فإذا حفظ حجم الغاز ثابتا ، كما فى الحالة 1 الموضحة فى الشكل ، فلن يبذل أى شغل ضد القوى الخارجية التى تحفظ الكباس فى مكانه لأن الكباس لايتحرك . إذن ، تعطى الطاقة الحرارية ΔQ_V جميعها إلى الغاز وتستخدم فى رفع الطاقة الداخلية للجزيئات . فإذا رمزنا للسعة الحرارية النوعية فى هذه الحالة بالرمز c_V ، إذن :

$$\Delta Q_V = mc_V \Delta T$$

حيث m كتلة الغاز فى الوعاء ، ويشير الدليل السفلى V إلى أن الحجم محفوظ ثابت .

فى الحالة 2 تلزم كمية أكبر من الطاقة الحرارية لرفع درجة الحرارة بنفس المقدار ΔT . هذا لأن طاقة حركة الجزيئات يجب أن ترتفع بنفس المقدار كما فى الحالة 1 ، لأن درجة الحرارة ترتفع بنفس المقدار فى كل حالة . ولكن ، بالإضافة إلى ذلك ، يجب أن تبذل كمية من الشغل Fh ضد القوة المؤثرة على الكباس عندما يرتفع مسافة قدرها h .

إذن :

$$\Delta Q_P = mc_P \Delta T = \text{الشغل المبذول ضد الكباس} + \text{الزيادة فى طاقة الجزيئات}$$

حيث يشير الدليل السفلى P إلى أن الضغط يظل ثابتا . وحيث أن الزيادة فى طاقة الجزيئات متساوية فى الحالتين ، فإن هذه الكمية تساوى $mc_V \Delta T$ فإذا استعضنا عن ΔQ_P بالكمية $mc_P \Delta T$ وعوضنا عن الكميتين الموجودتين فى الطرف الأيمن من المعادلة السابقة سنجد أن :

$$mc_p \Delta T = mc_V \Delta T + Fh$$

ولكن القوة المؤثرة على الكباس F هي مجرد الضغط مضروبا فى مساحة الكباس A ، وعليه فإن $Fh = P_0 Ah$ حيث أن Ah هى الزيادة فى حجم الوعاء ΔV نتيجة لارتفاع الكباس ، فإن المعادلة السابقة يمكن أن تكتب كمايلى :

$$(c_V - c_p)m \, \Delta T = P_0 \, \Delta V$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة بتطبيق المعادلة (١٠ - ٢) ، أى قانون الغاز المثالى ، على الوعاء الابتدائى فى الحالة 2 :

$$P_0 V_0 = nRT_0$$

وبعد التسخين ، فى الحالة 2 ، تتحول المعادلة إلى الصورة :

$$P_0(V_0 + \Delta V) = nR(T_0 + \Delta T)$$

وبطرح أولى هاتين المعادلتين من الثانية نحصل على :

$$P_0 \, \Delta V = nR \, \Delta T$$

وبالتعويض عن $P_0 \, \Delta V$ فى المعادلة السابقة التى تحتوى على $c_p - c_V$ سنجد أن :

$$(c_p - c_V)m \, \Delta T = nR \, \Delta T$$

وباختصار المعاملات المتشابهة نجد أن :

$$c_p - c_V = \frac{nR}{m}$$

ولكن عدد الجزيئات الكيلوجرامية من الغاز n يرتبط بالوزن الجزيئى M وكتلة الغاز m الموجودة فى الوعاء بالعلاقة $n = m/M$ إذن ، يمكننا أن نستعيض عن n/m بالمقدار $1/M$ لنحصل على :

$$c_p - c_V = \frac{R}{M}$$

وكما سوف ترى فى المسألة ١٣ فى نهاية هذا الفصل ، تتفق هذه النتيجة النظرية جيدا مع البيانات المدرجة فى الجدول (١١ - ٢) .

إذا وضع سائل فى طبق غير مغطى فإنه سوف يتبخر ببطء . وذلك نتيجة لأن طاقة جميع جزيئات السائل ليست متساوية . وقد وضحنا فى الفصل الأخير أن بعض جزيئات الغاز طاقتها أكبر كثيرا من المتوسط ، كما أن طاقة بعض الجزيئات الأخرى صغيرة جدا . وهذا صحيح أيضا فى حالة السوائل . فإذا كانت الجزيئات ذات الطاقة العالية جدا قريبة من سطح السائل فإنها قد تهرب بالفعل من الجزيئات الأخرى وتترك السائل . وهذه هى عملية التبخر .

والجزيئات المتبخرة هى الجزيئات ذات أعلى طاقة . وهى تسلب الطاقة من السائل ، لذلك فإن التبخر يؤدى إلى نقص فى متوسط الطاقة الداخلية للجزيئات المتبقية . وحيث أن درجة حرارة السائل ماهى إلا مقياس لطاقته الداخلية ، فمن الواضح أن التبخر سوف يؤدى إلى تبريد السائل . وهذه العملية تمثل فى الحقيقة أساسا لكثير من أجهزة التبريد .

الحرارة اللازمة ، أى الطاقة اللازمة ، لفصل وحدة الكتل من الجزيئات عن بعضها البعض لتحويلها من طور السيولة إلى طور البخار تسمى **حرارة تبخير السائل**. وحيث أن جزيئات السائل أقل ارتباطا ببعضها البعض عند درجات الحرارة العالية عنها عند درجات الحرارة المنخفضة ، فإن الطاقة اللازمة لفصل الجزيئات تقل بزيادة درجة الحرارة . فمثلا ، حرارة تبخير الماء تساوى 590 cal/g عند درجة 10°C بينما تساوى 539 cal/g عند درجة 100°C بمعنى أن 590 cal من الطاقة الحرارية تلزم لفصل 1 g من جزيئات الماء عن بعضها البعض عند درجة 100°C . **تعريف**

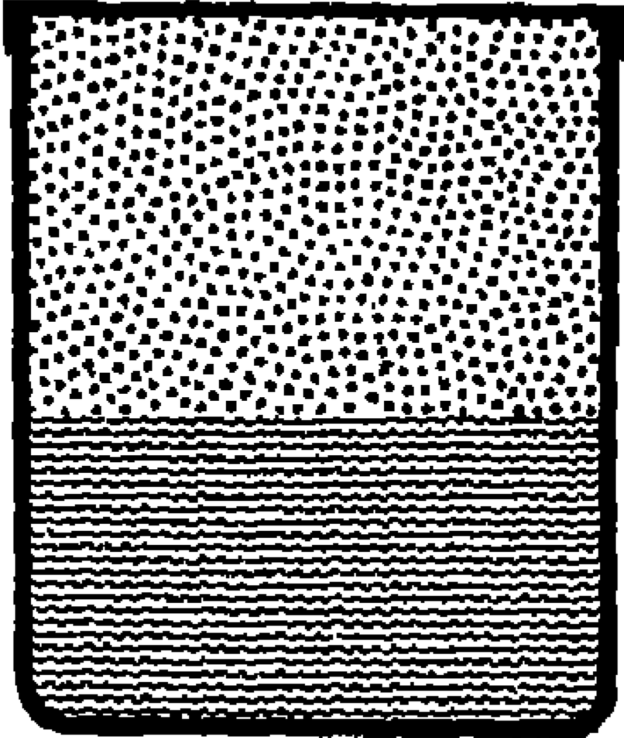
والعكس صحيح أيضا .،عندما يتكثف البخار متحولا إلى سائل تنطلق حرارة التبخير فى هذه العملية . ويوضح الجدول (١١ - ٣) بعض القيم النموذجية لحرارة التبخير . **حرارة التبخير**

جدول (١١ - ٣)

حرارة التبخير وحرارة الإنصهار لبعض المواد .

المادة	نقطة الانصهار °C	نقطة الغليان ، °C	حرارة الانصهار ، cal/g	حرارة التبخير ، cal/g
رصاص	327		5.9	
ماء	0	100	80	539
زئبق	− 39	357	2.8	65
كحول ايثيلى (ايثانول)	−114	+ 78	25	204
نيتروجين	−210	−196	6.1	48
اكسجين	−219	−183	3.3	51

تعطى حرارة تبخير السوائل عادة عند درجة الغليان العادية ، وذلك لأن السوائل تتبخر بسهولة كبيرة عندما تصل إلى هذه الدرجة . وفى الحقيقة فإن الفقاعات تتكون عندئذ فى داخل السائل ، وتستخدم هذه الظاهرة كطريقة شائعة لمعرفة ماإذا كان السائل قد وصل إلى درجة غليانه . لنفحص الآن معنى درجة الغليان بدلالة حرارة تبخير الجزيئات .



شكل (١١ - ٤)
عندما يكون البخار مشبعا ، يكون عدد جزيئات السائل التى تتبخر من السطح فى زمن معين مساويا لعدد الجزيئات التى تتكثف من البخار فى نفس الزمن .

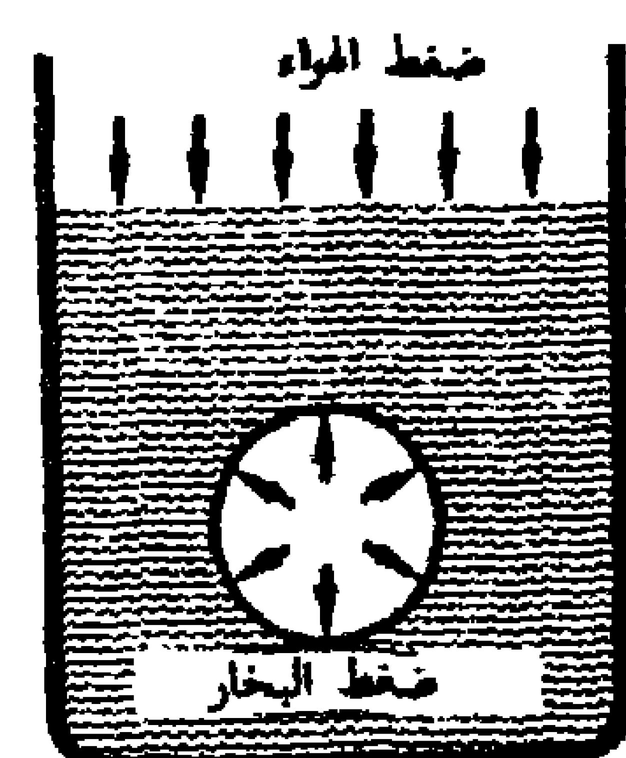
لنفرض أننا وضعنا سائلا فى وعاء مغلق مفرغ من الهواء . فى هذه الحالة سوف تتبخر بعض جزيئات السائل إلى الفراغ الموجود فوق سطحه ، كما هو مبين فى الشكل ١١ - ٤ . وبالطبع فإن العملية العكسية ممكنة ، فمن آن إلى آخر يصطدم جزىء بخار بسطح السائل ويلتصق به ، وكلما ازداد عدد الجزيئات فى البخار ، كلما ازدادا بالتالى عدد الجزيئات التى تعود إلى السائل . وعندما يزداد عدد الجزيئات فى البخار إلى حد معين ، يصل النظام إلى حالة يكون فيها عدد الجزيئات التى تترك السائل مساويا لعدد الجزيئات التى تعود إلى السائل من البخار . وعندئذ سوف يظل عدد الجزيئات فى البخار ثابتا عند هذا الحد إذا لم تتغير درجة

حرارة النظام ويقال أن البخار مشبعا تحت هذه الشروط . ويعرف ضغط الجزيئات فى البخار تحت هذه الشروط **بضغط البخار** للسائل . ويزدادا ضغط البخار بارتفاع درجة الحرارة ، لأن الجزيئات تتبخر بسهولة أكبر عند درجات الحرارة الأعلى ، ويوضح الجدول ١١ — ٤ تغير ضغط البخار مع درجة الحرارة بالنسبة للماء . لاحظ أنه حتى الثلج له ضغط بخار محسوس .

جدول (١١ — ٤)
ضغط البخار للماء والثلج .

درجة الحرارة ، °C	ضغط البخار ، * mm Hg, or Torr	درجة الحرارة °C	ضغط البخار * mm Hg, or Torr
−90	0.000070	90	526
−50	0.030	94	611
−10	1.95	99	733
0	4.58	100	760
10	9.21	110	1,075
30	31.8	150	3,570
60	149.4	200	11,650

* تعرف وحدة الضغط Torr بالعلاقة 1 Torr = 1 mm Hg . وقد سميت باسم العالم توريشللى .



شكل (١١ — ٥)
درجة الغليان هى درجة الحرارة التى يتساوى عندها ضغط البخار فى الفقاعة مع الضغط الخارجى على السائل (حجم الفقاعة مبالغ فيه) .

يحدث بين حين وآخر أن تكتسب مجموعة من الجزيئات فى داخل السائل طاقة كافية لفصلها من السائل فتكون فقاعة صغيرة ، ويمثل الشكل ١١ — ٥ حالة مبالغا فيها بدرجة كبيرة . وعند درجات الحرارة المنخفضة يكون ضغط البخار داخل الفقاعة أصغر بدرجة كبيرة من الضغط الجوى فوق السائل . ومن ثم فإن الفقاعة تضمر وتتلاشى تحت تأثير ضغط الهواء قبل أن تجد الفرصة للنمو إلى حجم ملحوظ . ومع ذلك ، إذا رفعت درجة حرارة السائل يمكن أن نصل إلى نقطة يكون فيها ضغط البخار داخل الفقاعة مساويا لضغط الهواء على سطح السائل . عندئذ لن تضمر الفقاعة وتتلاشى ، وبدلا من ذلك فإنها سوف تنمو وترتفع إلى سطح السائل . وبحدوث هذه العملية فى أماكن متفرقة كثيرة داخل السائل تنشأ ظاهرة الغليان .

ومن الواضح أن السائل يغلى عند درجة الحرارة التى يكون فيها ضغط البخار للسائل مساويا بالضبط للضغط الخارجى على السطح . ويستخدم التفريغ عادة فى التطبيقات العلمية والصناعية عند تقطير السوائل . ذلك لأن الضغط الخارجى المنخفض يسمح للسائل بالغليان عند درجة حرارة منخفضة ويقلل احتمال التفاعل الكيميائى داخله .

وبهروب بخار السائل الذى يغلى ، تسلب الجزيئات ذات الطاقة العالية من السائل كمية من الطاقة . فإذا أريد الاستمرار فى الغليان لابد أن تمد الحرارة باستمرار لكى

تعادل هذه الطاقة المفقودة . وإذا حاول أحدنا تسخين سائل فوق درجة غليانه تحت ضغط خارجي معين ، فإن السائل سوف يغلي بشدة أكثر فقط ، ولن ترتفع درجة حرارته أعلى من ذلك إلى أن يتبخر كلية . ويحدث الاستثناء الوحيد عندما تفشل الفقاعات فى التكون ، وفى هذه الحالة يحمى السائل . وحيث أن الفقاعات تتكون أولا بسهولة كبيرة على الشوائب كدقائق الغبار أو فقاعات الهواء ، فمن غير الغريب أن يحمى سائل نقى جدا لايحتوى على أى غازات ذاتية فيه . وعندما تبدأ الفقاعات فى التكون فى مثل هذا السائل فإن ذلك يحدث بشدة كبيرة تقرب من الانفجار .

تعطى درجة غليان وحرارة التبخير لمختلف السوائل عادة فى حالة الغليان تحت الضغط العيارى وهو (760 mmHg (or Torr . وتحت هذه الشروط تكون حرارة تبخير الماء 539 cal/g ودرجة غليانها 100°C ، بالطبع . ومن المهم أن نلاحظ أن الضغط الجوى فى منطقة روكى ماونتين (Rocky Mountain) فى المدن التى ترتفع أكثر من ميل واحد عن سطح البحر كمدينة دنفر (Denver) وتشيين (Cheyenne) ولارامى (Laramie) أقل كثيرا من 760 Torr ، إذ يبلغ الضغط على هذه الارتفاعات حوالى 600 Torr ولذلك يغلى الماء عند حوالى 94°C . لماذا تعتبر قدور الضغط هامة جدا فى هذه الظروف ؟

١١ - ٦ حرارة الإنصهار والصهر

تنصهر بلورات الثلج عند درجة O°C تحت الضغط العيارى (76 cm Hg) . وقبل الإنصهار تكون جزيئات الماء مرتبة فى نسق بلورى محكم ، وتحفظ الجزيئات ثابتة فى مواضعها بواسطة قوى تجاذب كبيرة بين الجزيئات . ولصهر البلورة يجب أن تنتزع الجزيئات من هذا الترتيب المحكم وتسبب خلل نظامها . وتحتاج هذه العملية إلى طاقة تزود بها المادة على هيئة حرارة عادة .

نرى من ذلك إذن أن المادة البلورية ، عند تسخينها ، تبدأ فى الانصهار عند درجة حرارة معينة . وعند اضافة الحرارة إلى خليط من المادة البلورية والسائل تظل درجة الحرارة ثابتة إلى أن يتم انصهار جميع البلورات . ولكل مادة نقطة انصهار معينة ، ولكى تنصهر المادة البلورية يجب تزويدها بكمية معينة من الحرارة عند هذه الدرجة . وتعرف **حرارة الانصهار** بأنها كمية الطاقة الحرارية اللازمة لصهر وحدة الكتلة من المادة البلورية . وتنطلق نفس هذه الكمية من الحرارة إلى الوسط المحيط عندما تتبلور وحدة الكتلة من السائل . وحرارة انصهار الماء هى 80 cal/g ، ويوضح الجدول ١١ - ٣ قيم حرارة الانصهار لبعض المواد الأخرى . ويلاحظ من هذا الجدول أن حرارة انصهار وحرارة تبخير المواد ذات الرابطة الايدروجينية ، كالماء والكحول الايثيلى (الايثانول) أكبر من الأخرى . لماذا ؟

تعريف حرارة الانصهار

يجب أن نذكر هنا بعض التأثيرات الأخرى لظواهر الإنصهار . أولا ، بعض اللدائن كالبوليثيلين متبلورة جزئيا ، أى أن جزءا فقط من المادة الصلبة يوجد فى حالة مرتبة ، بينما يوجد الجزء الآخر فى حالة السيولة ، والجزءان ممتزجان مزجا حميما . لهذا فإن الخواص الفيزيائية للمادة وسط بين الجوامد والسوائل . وتختلف تلك المناطق المتبلورة فى درجة الكمال ، والبلورات الأقل كمالا تنصهر عند درجة حرارة أقل من نقطة انصهار البلورات الأكثر كمالا : ومن ثم فإن لهذه المواد مدى انصهار — وليس نقطة انصهار — قد تصل سعته 20°C أو أكثر . ويراعى عند استخدام الجداول أن نقطة الانصهار المسجلة لمثل هذه المواد تكون عادة درجة الحرارة التى تختفى عندها درجة التبلور تماما .

وبعض اللدائن الأخرى ، كالبوليستيرين ، مواد زجاجية صافية صلدة . وهذه المواد ، كما وضحنا فى الفصل التاسع ، هى مجرد سوائل لزجة جدا ، وجزيئاتها ليست مرتبة بنظام كما فى الجوامد . وبالرغم من أنها تلين عند درجة محددة تماما ، الا أن حرارة الإنصهار لاتدخل فى هذه العملية كما فى حالة انصهار المادة البلورية .

يمكن تغيير درجة تجمد السوائل إلى حد ما بتطبيق ضغط كبير على النظام . فإذا كانت المادة تنكمش عند تجمدها فإن درجة التجمد سوف ترتفع بزيادة الضغط ، وهذا هو سلوك معظم المواد بالفعل . ولكن قليلا من المواد ، كالماء يتمدد عند التجمد ، وفى هذه الحالة تسبب زيادة الضغط انخفاض نقطة تجمد هذه المواد . لذلك فإن ضغط المتزلج على الثلج قد يسبب انصهار الثلج تحته . وفى هذه الحالة يتزلج المتزلج حقيقة على ثلج مشحم بغشاء رقيق من الماء .

١١ – ٧ قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)

يمكن توضيح كثير من المواقف المتعلقة بالتبادل الحرارى بتطبيق المعادلة البسيطة الآتية :

الحرارة المكتسبة = الحرارة المفقودة

وعموما ، تتضمن هذه المواقف تبادل الحرارة داخل وعاء معزول — المسعر — الذى يعزل النظام عزلا جيدا عن الوسط المحيط . والمعادلة السابقة ببساطة هى صيغة لقانون بقاء الطاقة . وسوف نوضح استخدامها ببعض الأمثلة .

١ – عند تسخين كتلة من المادة m (أو تبريدها) ، عددا معينا من درجات الحرارة ΔT ، فإنها تكتسب (أو تفقد) كمية من الحرارة تعطى بالمعادلة (١١ – ١) ، وبالتحديد :

$$mc\,\Delta T$$

(يفترض عدم حدوث تغير فى الطور فى هذا المدى من درجات الحرارة) .

٢ – عندما تنصهر كتلة من المادة m (أو تتبلور) ، فإنها تكتسب (أو تفقد) كمية من الحرارة قدرها :

$$mH_f$$

حيث H_f حرارة الانصهار .

٣ – عندما تتبخر كتلة من المادة m (أو تتكثف) ، فإنها تكتسب (أو تفقد) كمية من الحرارة قدرها :

$$mH_v$$

حيث H_v حرارة التبخر .

مثال توضيحى ١١ – ٤ : سخنت قطعة من الرصاص كتلتها 100 g إلى درجة 100°C ثم اسقطت فى تجويف فى قالب كبير من الثلج درجة حرارته 0°C . ماهى كمية الثلج التى سوف تذوب ؟

طريقة الحل :

الحرارة المستخدمة لصهر الثلج = الحرارة المفقودة بواسطة الرصاص

$$m_{Pb}c_{Pb}\,\Delta T = m_w H_{fw}$$
$$(100\ g)[0.031\ cal/(g)(^\circ C)](100 - 0^\circ C) = (m_w)(80\ cal/g)$$
$$m_w = 3.9\ g$$

استخرجت الثوابت المختلفة من الجدولين ١١ – ١ و ١١ – ٣ .

مثال توضيحى ١١ – ٥ : إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية لمسعر على هيئة علبة من النحاس كتلتها 10 g ، ويحتوى على 20 g من الثلج ، هى -30°C ، فما هى كمية بخار الماء (درجة حرارته 100°C) التى يجب أن تتكثف فى هذه العلبة لكى يتحول الثلج إلى ماء . ويسخن إلى درجة 40°C ؟

طريقة الحل :

الحرارة المكتسبة بواسطة الثلج والعلبة = الحرارة المفقودة بواسطة البخار

يجب أن يتكثف بخار الماء أولا متحولا إلى ماء درجة حرارته 100°C وبعد ذلك يجب أن يبرد الماء إلى درجة الحرارة النهائية وقدرها 40°C . إذن :

$$\text{الحرارة المفقودة} = mH_v + mc\,\Delta T$$
$$= (m)(540) + (m)(1)(100 - 40) = 600m$$

وتحتاج العلبة فقط إلى تسخينها من 30°C- إلى 40°C+ . ومن ناحية أخرى يلزم أن يدفىء الثلج إلى درجة 0°C ثم ينصهر متحولا إلى ماء وبعد ذلك يسخن الماء إلى درجة 40°C .

الحرارة المكتسبة

$$= (m_{Cu}c_{Cu})(70) + (m_w c_{ice})(30) + m_w H_{fw} + (m_w c_w)(40)$$
$$= (10)(0.093)(70) + (20)(0.50)(30) + (20)(80) + (20)(1)(40)$$
$$= 65 + 300 + 1600 + 800$$
$$= 2765 \text{ cal}$$

وقد حذفت الوحدات من هذه المعادلات لتوفير حيز الورقة ، وننصحك بكتابة المعادلة مرة ثانية مستخدما فيها الوحدات للتحقق من صحة وحدات الاجابة . وبمساواة الحرارة المكتسبة بالحرارة المفقودة نحصل على كتلة بخار الماء المطلوبة :

$$m = \frac{2765}{600} = 4.6 \text{ g}$$

لاحظ أن كمية بخار الماء اللازمة صغيرة جدا . ومن الواضح أن البخار قد فقد الكمية الأكبر من الحرارة أثناء عملية التكثف ، وبالتحديد 2500 cal من الكمية الكلية وقدرها 2765 cal . يمكنك أن تفهم من ذلك لماذا يمكن أن يسبب البخار الساخن فى ظروف معينة حروقا أشد من الحروق التى يسببها الماء الساخن .

مثال توضيحى ١١ – ٦ : اصطدمت طلقة من الرصاص كتلتها 10 g تسير بسرعة قدرها 100 m/s بقالب من الخشب فدفنت نفسها فيها . ماهو الارتفاع فى درجة حرارة الطلقة بالتقريب نتيجة للتصادم ؟

طريقة الحل : افترض أن طاقة حركة الطلقة بأكملها تتحول إلى حرارة كامنة فى الطلقة . (هل يمكنك إثبات هذا الفرض ؟) . وعليه فإن الحرارة المكتسبة بواسطة الطلقة ستساوى طاقة حركتها المفقودة .

$$\text{طاقة حركة الطلقة} = \tfrac{1}{2}mv^2$$
$$= (\tfrac{1}{2})(0.010 \text{ kg})(100 \text{ m/s})^2 = 50 \text{ J} = 12 \text{ cal}$$

لاحظ تحويل الوحدات من الجول إلى السعر .

$$m_{Pb}c_{Pb}\,\Delta T = \text{الحرارة المكتسبة}$$
$$12\text{ cal} = (10\text{ g})[0.031\text{ cal/(g)(°C)}]\,\Delta T$$
$$\Delta T = 39°\text{C}$$

وعليه ، إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للطلقة 20°C فإن درجة حرارتها النهائية ستكون 59°C . وإذا كانت الطلقة تتحرك بسرعة قدرها 600 m/s ، يمكننا أن نجد باستخدام الطريقة السابقة أن ΔT أكبر 36 مرة من القيمة السابقة ، أى أن درجة الحرارة النهائية ستكون 1430°C . وبالطبع فإن الطلقة سوف تنصهر قبل الوصول إلى هذه الدرجة ، وبالتالى فإن الحسابات السابقة لن تكون صحيحة . كيف يمكن اجراء الحسابات فى الحالة الأخيرة ؟

مثال توضيحى ١١ – ٧ : عندما يقول المتخصصون فى التغذية أن 1 kg من الخبز قيمته الغذائية هى 2600 cal فإنهم يعنون أنه إذا حرق الخبز المجفف فى الأكسجين النقى فإنه سوف يعطى 2600 cal من الطاقة الحرارية . (يولد الجسم الحرارة من الوقود أساسا بتفاعل كيميائى مشابه) . قدر كمية الطاقة الحرارية التى يطلقها الجسم كل يوم .

طريقة الحل : يختلف السعر الغذائى اليومى اللازم للإنسان من شخص إلى آخر ، ولكنه يتروح بين 2000 سعر و 3000 سعر . وحيث أن هذه السعرات هى فى الحقيقة سعرات كبيرة ، فإن عملية الأيض (التفاعل الحيوى) فى داخل الجسم تولد حوالى 2×10^6 cal من الحرارة . وحيث أن درجة حرارة الجسم تظل ثابتة تقريبا . فإن الجسم يجب أن يفقد هذه الطاقة عند تولدها . وفى الحقيقة فإن طرق توليد هذه الطاقة داخل الجسم واطلاقها معقدة جدا ، وهى تناقش فى كتب الكيمياء الحيوية والفيزياء الحيوية . وبالرغم من ذلك فإننا نعلم أن هواء الزفير وتبخر العرق من الجلد هما طريقتان معروفتان جيدا لتبريد الجسم ، ولكن هناك طرقا أخرى على نفس الدرجة من الأهمية .

١١ – ٨ التمدد الحرارى

رأينا مما سبق أن درجة حرارة المادة مقياس للطاقة الداخلية لجزيئاتها . وعند رفع درجة حرارة السائل أو الجامد تزداد طاقة جزيئاته وبالتالى تزداد سعة اهتزازها ، وهذا يؤدى إلى زيادة متوسط المسافة بين كل جزىء والجزيئات المجاورة . أى أن السائل أو الجامد يتمدد عند رفع درجة حرارته . وبالرغم من

وجود بعض الاستثناءات الواضحة من هذه القاعدة (الماء ، مثلا ، ينكمش* عند رفع درجة حرارته فى المدى من O°C إلى 4°C) فإن معظم المواد تتمدد بارتفاع درجة الحرارة ، بشرط عدم حدوث تغير فى الطور .

من الواضح أن التمدد الحرارى للمعدن فى بناء أو قنطرة يمكن أن يكون أمرا ذا أهمية عملية كبيرة . فإذا لم يؤخذ التمدد الحرارى فى الاعتبار فإن قضبان السكك الحديدية وخرسانة الطرق السريعة سوف تنبعج تحت تأثير شمس الصيف الساخنة . كذلك فإن كثيرا منا قد عاش أو عمل فى أبنية تؤدى فيها مواسير التطويل التى يمر بها البخار فى أنظمة التدفئة إلى تأثيرات واضحة . لهذه الأسباب ، ولأسباب أخرى كثيرة ، من الضرورى أن نعرف بدقة كيف تتمدد المادة مع درجة الحرارة . لهذا الغرض تم تعريف وجدولة ثابتين للتمدد الحرارى هما ثابت التمدد الحرارى الطولى α (الفا) وثابت التمدد الحرارى الحجمى γ (جاما) .

تعريف **يعرف معامل التمدد الحرارى الطولى** α بأنه الزيادة فى الطول لوحدة الأطوال من المادة نتيجة لتغير درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة . ويكتب هذا التعريف على هيئة معادلة كمايلى :

$$\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T}$$

أى أنه إذا تمدد قضيب طوله L بمقدار ΔL نتيجة لرفع درجة الحرارة بمقدار ΔT ، فإن قيمة α تعطى بالمعادلة السابقة . لاحظ أن وحدات الطول تختصر ، وعليه فإن وحدات α هى مقلوب درجة الحرارة ، أى $1\,°C^{-1}$ or $1\,°F^{-1}$. ويمثل الجدول ١١ — ٥ بعض القيم الفعلية للمعامل .

وعلى سبيل المثال ، إذا رفعت درجة حرارة قضيب من النحاس طوله L m بمقدار ΔT فإنه سوف يستطيل بمقدار ΔL يعطى من تعريف α بالعلاقة :

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha\,\Delta T \qquad (١١ - ٢)$$

فإذا كان طول القضيب L هو 1.00 m وكان الارتفاع فى درجة الحرارة هو 50°C فإن (استخرج قيمة α من الجدول ١١ — ٥) :

* فى الماء تسبب الرابطة الايدروجينية تجمع الجزيئات فى مجموعات من عدة جزيئات لكل منها ترتيب محدد حتى فوق درجة انصهار الثلج . وبارتفاع درجة الحرارة تتكسر هذه المجموعات مما يؤدى إلى ترتيب جديد أكثر تضاما للجزيئات .

$$\Delta L = (1.00\text{ m})(19 \times 10^{-6}\,°\text{C}^{-1})(50\,°\text{C}) = 0.00095\text{ m}$$

جدول (١١ – ٥)

معاملات التمدد الحرارى لكل درجة سلسيوس عند 20°C لبعض المواد .

المادة	α,* $\times 10^6$	γ,* $\times 10^6$
ماس	1.2	3.5
زجاج (مقاوم للحرارة)	~3	~9
زجاج (لين)	~9	~27
حديد	12	36
قرميد وخرسانة	~10	~30
نحاس أصفر	19	57
المنيوم	25	75
زئبق		182
مطاط	~80	~240
جلسرين		500
جازولين		~950
كحول ميثيل (ميثانول)		1200
بنزين		1240
اسيتون		1490

* تعنى الدلالة الموجودة فى رأس العمود أن جميع قيم α و γ مضروبة فى 10^6 . إذن α للحديد هو $12 \times 10^{-6}\,°\text{C}^{-1}$

وحيث أن التغير فى الطول صغير جدا فى الواقع ، فإن قيمة L المستخدمة لتعيين ΔL ليست حساسة بدرجة كافية لأن نهتم كثيرا بدرجة حرارة قياسه . وفى الحقيقة ، يتغير α قليلا مع درجة الحرارة ، لذلك يجب استخدام القيمة المناسبة لكل مدى معين من درجات الحرارة فى حالة الحسابات عالية الدقة . ومع ذلك ، من النادر جدا أن يكون لهذا التعقيد أية أهمية فى التطبيقات العملية .

تعريف

يعرف **معامل التمدد الحرارى الحجمى** لمادة ما بطريقة مشابهة لمعامل التمدد الحرارى الطولى . وعليه فإن معامل التمدد الحرارى الحجمى هو التغير النسبى فى الحجم لكل درجة ، أو ، فى صورة معادلة :

$$\gamma = \frac{\Delta V/V}{\Delta T}$$

ومنه نجد مباشرة أن :

$$\Delta V = \gamma V \Delta T \qquad (١١ - ٣)$$

ووحدات γ هى مقلوب درجة الحرارة . وكمثال لتطبيق هذه المعادلة افترض أن 100 cm^3 من البنزين قد سخنت من 20°C إلى 25°C . فى هذه الحالة سوف يتغير الحجم بمقدار (استخرج قيمة γ من الجدول ١١ – ٥) .

$$\Delta V = (1.24 \times 10^{-3}{}^\circ C^{-1})(100\ cm^3)(5^\circ C) = 0.62\ cm^3$$

وهذا التغير يمثل 0.6% من الحجم الأصلى وهو تغير كبير فى V لكثير من الأغراض . من الضرورى إذن تحديد درجة الحرارة المقاس عندها V إذا أريد استخدام قيم γ المدرجة فى الجدول ١١ — ٥ ؛ لاحظ أن هذه القيم صحيحة عند درجة الحرارة 20°C . وبالطبع يمكن حساب ΔV للتغيرات الصغيرة فى درجة الحرارة التى لاتبعد كثيرا عن T=20°C بدقة كبيرة باستخدام قيمة V المقاسة عند أى درجة تقع فى هذا المدى الصغير من درجات الحرارة .

يبين فحص الجدول ١١ — ٥ أن معامل التمدد الطولى للجوامد يساوى ثلث معامل التمدد الحجمى تقريبا . وهذه قاعدة عامة لمعظم الجوامد المتجانسة ، أى ذات الخواص الواحدة فى الاتجاهات المختلفة . وسوف نترك للطالب إثبات صحة هذه القاعدة باستخدام تعريفى α و γ كتمرين .

مثال توضيحى ١١ — ٨ : لوح من الخرسانة فى طريق سريع طوله 20 yd . مامقدار الزيادة فى طوله عند درجة 126°F عن طوله فى درجة O°F ؟

طريقة الحل : نعلم أن :

$$\Delta L = \alpha L\, \Delta T$$

من الجدول ١١ — ٥نجد أن$\alpha \approx 10 \times 10^{-6}{}^\circ C^{-1}$ ولاستخدام العلاقة السابقة يجب أن تكون درجة الحرارة مقاسة بدرجة سلسيوس . إذن $\Delta T = 126^\circ F = (\frac{5}{9})(126) = 70^\circ C$ وعليه :

$$\Delta L = (10^{-5})(70)(20\ yd) = 14 \times 10^{-3}\ yd = 0.5\ in$$

وتظهر هذه الزيادة فى صورة شق تمددى بهذا الحجم أو انبعاج فى الخرسانة .

مثال توضيحى ١١ — ٩ : فى وقت متأخر من المساء ملأ مالك سيارة خزان وقودها بالجازولين تماما ثم أوقفها فى مرأب (جاراج) . وكانت درجة حرارة الجازولين فى ذلك الوقت 68°K ، بينما كانت سعة الخزان 16 gal . وعندما عاد فى اليوم التالى كانت الشمس قد سخنت الجازولين إلى درجة 131°F . ماكمية الجازولين التى فاضت من الخزان ؟

طريقة الحل : أولا يجب تحويل درجتى الحرارة إلى مقياس سلسيوس لكى يكمننا استخدام العلاقة (١١ — ٣) . عندئذ سنجد أن درجتى الحرارة المذكورتين فى نص المسألة يعادلان 20°C و 55°C . وحيث أن درجة الحرارة الابتدائية هى 20°C ، لن

يكون من الخطأ استخدام قيمة γ المدرجة فى الجدول ١١ — ٥ . من تعريف γ نجد أن :

$$\Delta V = \gamma V \Delta T = (0.95 \times 10^{-3})(16)(35) = 0.53 \text{ gal}$$

وحتى إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 55°C فإن الخطأ الناتج من استخدام الحجم عند تلك الدرجة لحساب ΔV سيساوى 3% فقط ، لأن ΔV يساوى 3% فقط من الحجم الكلى . ومع ذلك ، إذا كان الحجم الابتدائى مقاسا عند درجة حرارة معينة T تختلف عن 20°C ، وكانت الدقة العالية مطلوبة ، يجب علينا أولا إيجاد الحجم عند درجة 20°C باستخدام العلاقة :

$$\Delta V = \gamma V_{20}(T - 20)$$

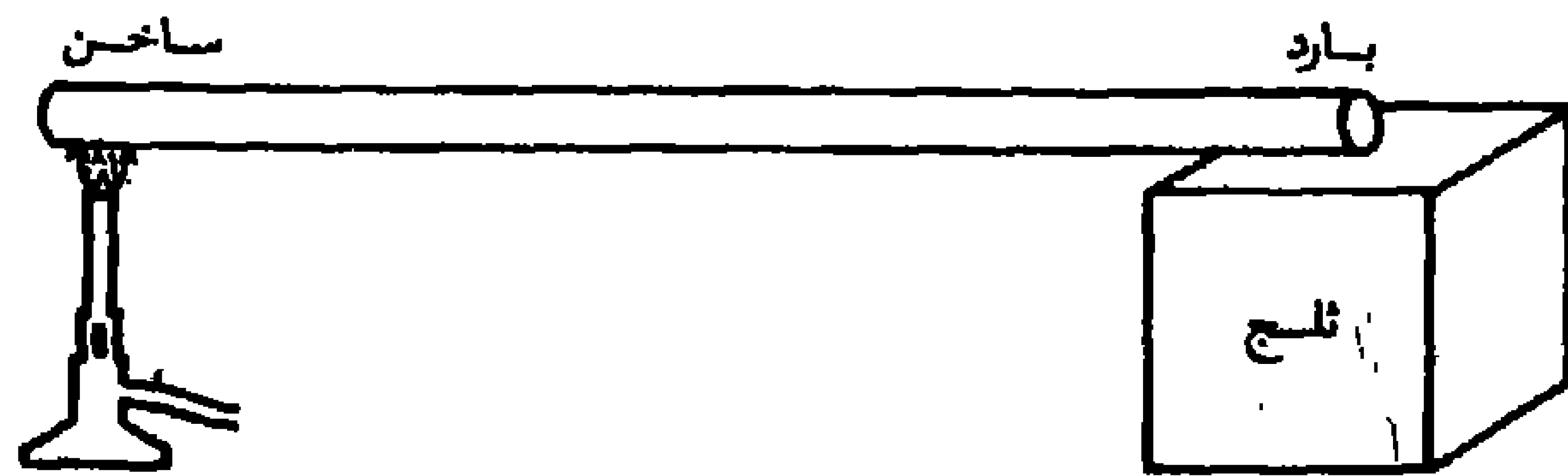
حيث :

$$\Delta V = V - V_{20}$$

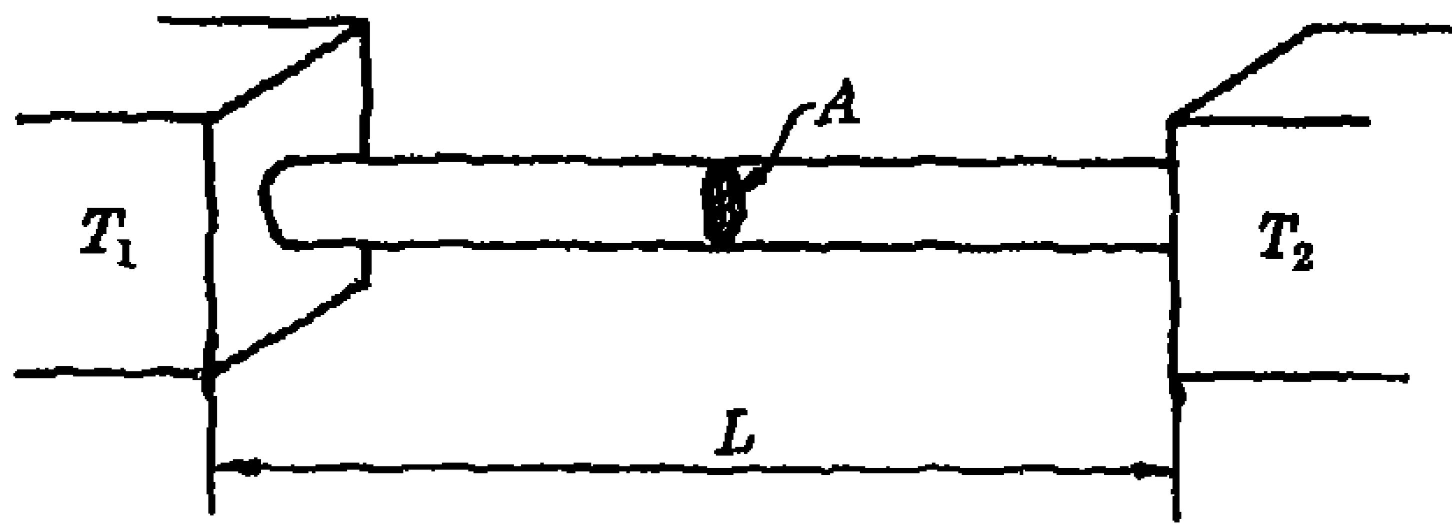
و V هو الحجم المقاس عند درجة الحرارة المعينة . يلاحظ أننا أهملنا تمدد خزان الجازولين نفسه . هل هذا خطأ كبير ؟

١١ — ٩ انتقال الحرارة : التوصيل

تمثل طاقة حركة جزيئات المادة ، كما رأينا ، الجزء الأعظم من الطاقة الحرارية فى المادة . وعملية انتقال الحرارة واضحة تمام الوضوح فى انتقال الطاقة الحرارية من الطرف الساخن لقضيب معدنى إلى طرفه البارد ، كما هو موضح فى الشكل ١١ — ٦ . وتتم هذه العملية بالطريقة الآتية . تكتسب الجزيئات الموجودة فى الطرف الساخن طاقة عالية فتزداد سعة اهتزازها . نتيجة لذلك تصطدم هذه الجزيئات بالجزيئات الأبرد الموجودة على يمينها فتنقل إليها جزءا من طاقتها . وهذه بالتالى تضرب الجزيئات البطيئة الموجودة على يمينها فتكسبها طاقة إضافية وهكذا . وعليه فإن الحرارة تنتقل فى القضيب بواسطة التصادمات الجزيئية . وتسمى هذه الطريقة **بالتوصيل** .



شكل (١١ — ٦)
تتحرك الحرارة من الطرف الساخن للقضيب المعدنى إلى الطرف البارد بالتوصيل .



شكل (١١ – ٧)
يتناسب معدل انسياب الحرارة فى القضيب طرديا مع $T_1 - T_2$ و A، وعكسيا مع L .

تعتمد سرعة انسياب الحرارة فى القضيب على المادة المصنوع منها . ونحن نعلم جميعا أن المعدن يوصل الحرارة أحسن من الخشب أو الزجاج . وهناك قاعدة عامة إلى حد ما تنص على أن الموصلات الكهربائية الجيدة موصلات حرارية جيدة . فالمعادن ، على وجه الخصوص ، موصلات جيدة للحرارة لأن الكترونات التكافؤ تتحرك حرة تقريبا فى المعدن حاملة معها طاقة الحركة (الحرارة) إلى أى مكان .

ولكى نعبر عن سريان الحرارة رياضيا ، لنتخيل التجربة الموضحة فى الشكل ١١ – ٧ الذى يمثل قضيبا معدنيا مساحة مقطعه A وطوله L متصلا بجهازين درجتا حرارتهما T_1 ، T_2 (حيث $T_1 > T_2$) ثابتتان.وحيث أن $T_1 > T_2$ فإن الطاقة الحرارية سوف تنساب فى القضيب من الطرف الساخن إلى الطرف البارد . لنسأل الآن ماهى كمية الحرارة ΔQ التى تنساب فى القضيب فى الزمن t . (افترض أن جوانب القضيب معزولة بحيث لاتستطيع الحرارة أن تنساب منه فى اتجاه نصف القطر) .

يمكننا أن نفترض أنه كلما زادت A ، كلما زادت كمية الحرارة المنسابة . إذن $\Delta Q \propto A$. وأيضا لن تنساب أى حرارة إذا كانت $T_1 = T_2$. وكتخمين أول يمكننا أن نقول أن $\Delta Q \propto T_1 - T_2$ وإذا كان القضيب طويلا جدا ، من المرجح أن يقل انسياب الحرارة ، ومن ثم يمكننا أن نفترض أن $\Delta Q \propto 1/L$. وبالطبع كلما كان الزمن t أطول ، كلما زادت كمية الحرارة المنسابة . وقد ثبت أن جميع هذه الافتراضات صحيحة ، إذ تبين من التجربة أن :

$$\Delta Q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)At}{L} \qquad (١١ - ٤)$$

حيث λ (لامدا) ثابت تناسب يسمى **الموصلية الحرارية** لمادة القضيب . ومن الواضح أن λ تكون كبيرة فى حالة الموصل الجيد للحرارة ، وصغيرة فى حالة الموصل الردىء . ويمثل الجدول ١١ – ٦ بعض القيم الفعلية للموصلية الحرارية . لاحظ أن الوحدات التى يجب استخدامها فى المعادلة (١١ – ٤) هى الوحدات المذكورة فى جدول الموصلية الحرارية .

جدول (١١ – ٦)
الموصلية الحرارية بالوحدات cal/(cm)(s)(°C) لبعض المواد .

المادة	λ
فضة	1.0
نحاس	1.0
ألمنيوم	0.50
نحاس أصفر	0.20
زجاج	$\sim 20 \times 10^{-4}$
ورق اسبستوس	$\sim 5 \times 10^{-4}$
مطاط	$\sim 5 \times 10^{-4}$

مثال توضيحى ١١ – ١٠ : قضيب من النحاس الأصفر مساحة مقطعه $A = 2.0\ cm^2$ وطوله $L = 1.00\ m$. وضع أحد طرفى هذا القضيب فى ماء يغلى ،

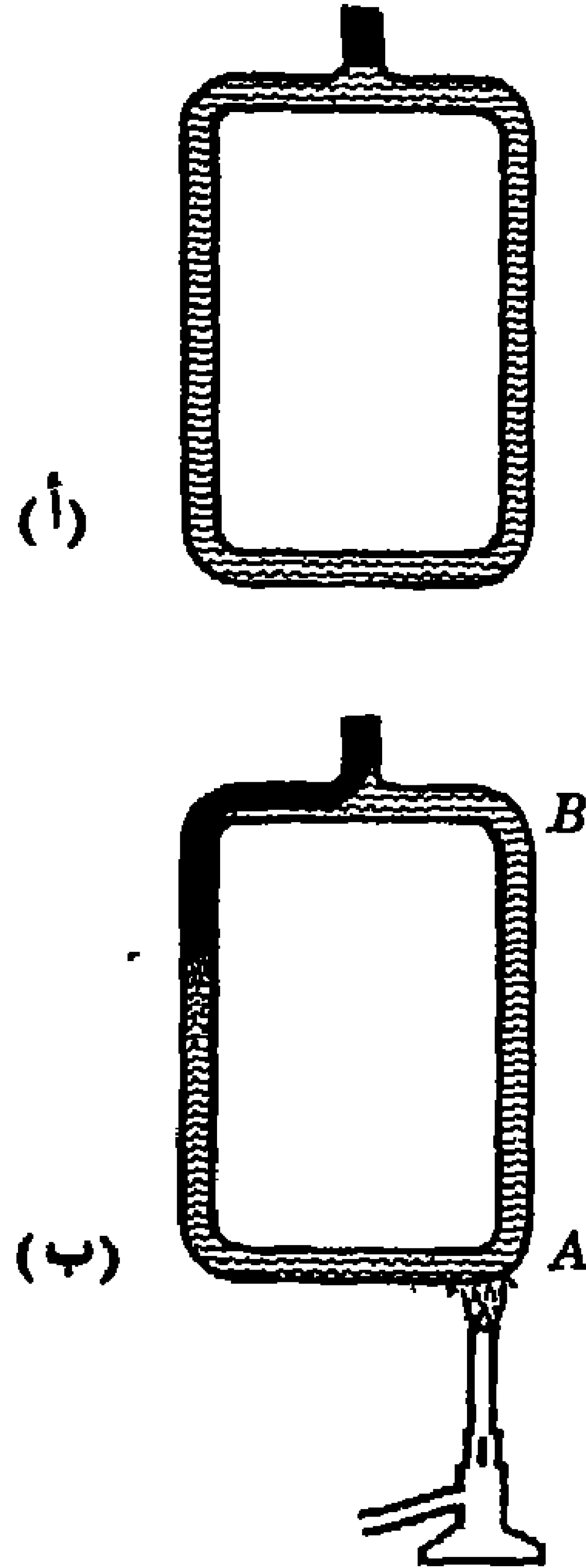
ووضع الآخر على كعكة من الثلج . ماهى كمية الثلج التى تنصهر بواسطة الحرارة المنتقلة من الطرف الساخن للقضيب إلى الطرف البارد فى زمن قدره 10 min ؟

طريقة الحل : نوجد أولا كمية الحرارة المنتقلة فى القضيب . معطيات المسألة بالوحدات المناسبة هى كالتالى : $A = 2.0\ cm^2$ ، $L = 100\ cm$ ، $T_1 - T_2 = 100°C$ ، $t = 600\ s$ ، $\lambda = 0.20\ cal/(cm)(s)(°C)$. بالتعويض فى المعادلة (١١ – ٤) نحصل على :

$$\Delta Q = 240\ cal$$

ولكن كمية الحرارة اللازمة لصهر 1 g من الثلج هى 80 cal . إذن كمية الثلج المنصهر فى هذا الزمن تساوى 240/80 g أو 3.0 g .

١١ – ١٠ انتقال الحرارة : الحمل



شكل (١١ – ٨)
تبين الصبغة أن السائل يدور فى الأنبوبة عند تسخينه فى عكس اتجاه عقارب الساعة . وتنقل الحرارة بواسطة السائل أثناء دورانه ، مما يؤدى إلى الحمل الحرارى .

الحمل الحرارى

يمثل الشكل ١١ – ٨ تجربة بسيطة توضح ظاهرة الحمل . فإذا ملأنا الأنبوبة المبينة فى الشكل بالماء ثم وضعنا قليلا من الصبغة الملونة قرب رقبتها فإنها سوف تظل ساكنة تقريبا فى مكانها كما فى الجزء أ . ولكن عند تسخين الأنبوبة كما هو مبين فى الجزء ب فإن السائل سوف يبدأ فى الانسياب داخل الأنبوبة عكس اتجاه عقارب الساعة ، حاملا معه الصبغة كما هو موضح .

وسبب هذه الحركة بسيط جدا . ذلك أن السائل أو الغاز يتمدد عند تسخينه ، ولذلك فإن الماء الموجود فى الركن الأيمن السفلى للأنبوبة عند A يتمدد نتيجة للتسخين فيصبح أخف من باقى السائل . ولهذا فإن العمود الأيمن من السائل لن يستطيع الاستمرار فى موازنة حمل العمود الأيسر الثقيل ، ولذلك فإن العمود الأيسر سوف يهبط فى الأنبوبة ، وينساب السائل نتيجة لذلك فى الجانب الأيسر إلى أعلى . وباستمرار هذا السائل فى الحركة تنخفض درجة حرارته ويصل بعد فترة من الزمن إلى الجانب الأيسر ، حيث يصبح أبرد وأكثف عما كان عند النقطة A . والخلاصة هى أن السائل المسخن عند A سوف يرتفع إلى B حاملا الحرارة معه . أى أن الحرارة قد انتقلت من A إلى B نتيجة لحركة السائل نفسه من A إلى B . وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة **بالحمل** .

لاحظ أن التوصيل لايتضمن حركة الجزيئات لمسافات كبيرة ، إذ تنتقل الحرارة من جزىء إلى آخر بالتصادم . أما فى الحمل فإن جزيئات المادة الناقلة للحرارة تتحرك من مكان إلى آخر حاملة معها الحرارة . والسوائل والغازات فقط هى التى تنقل الحرارة بالحمل لأن جزيئات هذه المواد فقط هى التى تستطيع أن تتحرك لمسافات كبيرة .

يدفأ كثير من المنازل بطرق الحمل الهوائى . والحركة الدورانية للهواء محسوسة بدرجة كافية حتى فى حالة أنظمة التدفئة التي لاتحتوى على مراوح . فمثلا ، إذا وقف شخص قرب جهاز التحكم فى خروج الهواء الساخن من فرن هوائى فإنه سيلاحظ اندفاع الهواء الساخن بوضوح من جهاز التحكم . ويجب أن يسمح تصميم أجهزة الحمل هذه للهواء البارد بالعودة إلى الفرن تماما كما يعود السائل البارد إلى النقطة A فى الشكل ١١ — ٨ ب . ومن الواضح أن الغرض من استخدام أجهزة تحكم الهواء البارد فى أنظمة التدفئة هو إعادة الهواء البارد إلى الفرن .

وتنشأ الظواهر الجوية جزئيا نتيجة لتيارات الحمل الهوائية ، وتعتبر تيارات حمل الهواء قرب حواف السلاسل الجبلية ذات أهمية خاصة فى هذا الشأن . ففى أوقات محددة مختلفة يوميا تلاحظ تأثيرات كبيرة فى الطقس نتيجة لهبوط الهواء البارد من الجبال مما يعمل على رفع الهواء الدافىء فى السهول القريبة إلى أعلى ويساعد ذلك على تلطيف الجو . ويعتبر كذلك تيار الخليج مثالا آخر لانتقال الحرارة بالحمل على نطاق واسع .

١١ — ١١ انتقال الحرارة : الإشعاع

نعلم جميعا أن الشمس تدفىء الأرض ، والشمس فى الحقيقة هى مصدرنا الأساسى للحرارة . ويمكننا أن نرى بسهولة أن الحرارة التى تصل الينا من الشمس لاتنتقل الينا بالتوصيل أو الحمل . ذلك أن الفراغ الهائل بيننا وبين الشمس لايحتوى تقريبا على أية جزيئات . وبناء على ذلك فإن الإنتقال الاهتزازى بالتوصيل أو الإنتقال الدورانى بالحمل مستحيلان . ومن ثم فإن هذه الحالة هى حالة انتقال للحرارة خلال الفراغ ، أى خلال العدم . وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة **بالإشعاع** . **الإشعاع الحرارى**

لم يستطع معظم العلماء لسنوات طويلة ، وحتى العقد الأول من هذا القرن ، أن يتصوروا أن الحرارة والضوء ينتقلان من الشمس خلال لاشىء . لذلك افترض هؤلاء العلماء أن الفراغ كله مملوء « بالأثير الوضاء (أى الناقل للضوء) » . وظل مفهوم الأثير الميكانيكى سائدا إلى أن اثبت اينشتين (فى عام ١٩٠٥) أنه غير ذى فائدة كما أنه لايمكن إثبات وجوده ، وبالتالى نبذ هذا المفهوم نهائيا . وحتى قبل ذلك واجه مفهوم الأثير صعوبات هائلة لم يستطع أن يتغلب عليها مما زعزع الثقة فيه . وفى الوقت الحاضر لايعتبر مفهوم الأثير ضروريا أو مناسبا ، وسوف نرى فى دراستنا للإشعاع الكهرومغناطيسى أن فهم طبيعة الإشعاع يمكن أن يتحقق بدونه .

وكما ألمحنا سابقا ، هناك علاقة مباشرة بين الإشعاع الحرارى والإشعاع الضوئى والإشعاع الكهرومغناطيسى (إشعاع الراديو) . وسوف نرى فى فصول تالية أن هذه الظواهر فى الحقيقة واحدة .

١١ – ١٢ قوانين التبريد

اثبت نيوتن أن تبريد المواد غير الساخنة جدا يتبع قانونا مناسبا وبسيطا . وقد وجد نيوتن بالتجربة أنه إذا كانت T_1 درجة حرارة الجسم و T_0 درجة حرارة الوسط المحيط ، فإن كمية الحرارة ΔQ المفقودة بواسطة الجسم فى زمن قدره t تعطى بالعلاقة

قانون نيوتن للتبريد

$$\Delta Q = (\text{const})(T_1 - T_0)t \qquad (١١ - ٥)$$

وهذه العلاقة تسمى **قانون نيوتن للتبريد** . ونحن نعلم الآن أن هذا القانون صحيح تقريبا فقط فى حالة ماإذا كان الفرق بين درجتى الحرارة $T_1 - T_0$ صغيرا فقط . ويمثل هذا القانون التأثيرات المشتركة للتوصيل والحمل والإشعاع .

وقد أثبت فى حالة فقدان الحرارة بالإشعاع فقط ، تجريبيا أولا ثم نظريا بعد ذلك ، أن كمية الحرارة التى يشعها الجسم الساخن تعطى بالمعادلة :

قانون ستيفان

$$\Delta Q = (\text{const})(T_1^4 - T_0^4)t \qquad (١١ - ٦)$$

وتعرف هذه العلاقة باسم **قانون ستيفان** . ويراعى عند استخدام هذا القانون أن تكون درجة حرارة الجسم الساخن T_1 ودرجة حرارة الجسم المحيط T_0 مقاستين بالدرجات المطلقة . وإذا كان الفرق بين درجتى الحرارة صغيرا فإن قانون ستيفان سوف يؤول إلى قانون نيوتن للتبريد .*

بالاضافة إلى ذلك ، أمكن إثبات أن الجسم الأسود (أى الجسم الذى لايعكس الضوء) يشع كمية من الحرارة أكبر من الجسم ذى الانعكاسية العالية . وكقاعدة عامة يمكننا القول أن الممتص الحرارى الجيد مشع حرارى جيد .

١١ – ١٣ الرطوبة

يعلم كل منا أن الهواء يحتوى على كمية كبيرة من بخار الماء فى اليوم الذى تكون فيه الرطوبة عالية . والرطوبة مقياس للمحتوى المائى للهواء . وعلى وجه الدقة ، تعرف الرطوبة النسبية (RH) بأنها النسبة بين كتلة بخار الماء لوحدة الحجوم فى الهواء وكتلة بخار الماء التى تسبب تشبع وحدة الحجوم عند نفس درجة الحرارة . وكما وضحنا من قبل فى هذا الفصل ، عندما يكون البخار المشبع متلامسا مع السائل ، فإن عدد الجزيئات التى تترك سطح السائل فى زمن معين تساوى عدد

* تركنا للطالب إثبات صحة ذلك كتمرين . لتحقيق ذلك يجب أن تعلم أنه إذا كانت $T_1 \approx T_0$ ، فإن
$T_1^4 - T_0^4 = (T_1^2 - T_0^2)(T_1^2 + T_0^2) \approx 2T_0^2(T_1^2 - T_0^2)$

الجزيئات التى تعود إليه. إذن ، عند التشبع لايحدث أى نقص أو زيادة فى التبخير . وإذا كان البخار أكثر من مشبع ، أى زائد التشبع تتكثف القطيرات من البخار وينتج عن ذلك تكون الضباب أو المطر .

وحيث أن ضغط الغاز المثالى يتناسب مع عدد الجزيئات ، يصاغ تعريف الرطوبة النسبية عادة بدلالة الضغوط وليس الكتل . ونظر لأن بخار الماء قريب جدا من الغاز المثالى ، فإن التعريفين متماثلان تقريبا . وفى صورة معادلة يمكننا وضع هذا التعريف كالتالى :

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{m}{m_s} \approx \frac{P}{P_s} \qquad (\text{١١} - \text{٧})$$

حيث P, m هما كتلة وحدة الحجوم وضغط بخار الماء فى الهواء ، m_s و P_s هما نفس هاتين الكميتين للبخار المشبع . ويوضح الجدول ١١ − ٧ بعضا من بيانات بخار الماء المشبع عند درجات حرارة مختلفة .

طبقا للجدول ١١ − ٧ ، يحتوى الهواء المشبع عند درجة 68°F على 17.1 g/m³ من الماء . لنفرض أن الهواء يحتوى بالفعل على 17.1 g/m³ من بخار الماء . فإذا كانت درجة حرارة الهواء فوق 68°F ، فإن الهواء يمكن أن يحتوى كمية أكبر من البخار . أما إذا كانت نفس الكمية من بخار الماء موجودة ثم برد الهواء تحت 68°F (كما يحدث عند غياب الشمس مثلا) ، فإنه سوف يصبح فوق مشبع بمجرد أن تنخفض درجة الحرارة تحت 68°F . وعند درجة الحرارة المذكورة وماتحتها تبدأ القطيرات فى السقوط من الهواء على هيئة ضباب أو ندى أو مطر . وتسمى درجة الحرارة التى يصبح الهواء عندها مشبعا بالكاد **نقطة الندى** .

تعريف نقطة الندى

ونقطة الندى للهواء كمية نافعة جدا . لنفرض أن درجة حرارة الهواء فى يوم معين كانت 89.6°F . وفى هذا اليوم قام إرصادى فى مكتب الأحوال الجوية بتبريد بعض الهواء حتى بدأ الندى أو الضباب الترسب فيه . لنفرض أن الإرصادى قد وجد أن نقطة الندى هى 60 .8°F . وبالإستعانة بالجدول ١١ − ٧ استطاع هذا الرجل أن يعلم أن الهواء يحتوى على 13.50 g/m² من بخار الماء ، لأن هذه هى قيمة ضغط بخار الماء المشبع عند درجة 60.8°F . وحيث أن درجة الحرارة الفعلية للهواء 89.6°F فإن الهواء المشبع عند هذه الدرجة يجب أن يحمل 33.45 g/m³ من الماء (انظر الجدول) . وبحساب الرطوبة النسبية باستعمال هاتين القيمتين ، وجد الإرصادى أن الرطوبة النسبية تساوى :

$$\mathrm{RH} = \frac{m}{m_s} = \frac{13.50}{33.45} \approx 0.40$$

جدول ١١ - ٧
خواص بخار الماء المشبع

T, °C	T, °F	m, g/m³	P, cm Hg
−8	+17.6	2.74	0.23
−4	24.8	3.66	0.33
0	32.0	4.84	0.46
4	39.2	6.33	0.61
8	46.4	8.21	0.80
12	53.6	10.57	1.05
16	60.8	13.50	1.36
20	68.0	17.12	1.75
24	75.2	21.54	2.23
28	82.4	26.93	2.82
32	89.6	33.45	3.55
36	96.8	41.82	4.44

وعادة تضرب هذه الاجابة فى 100 ونقول أن الرطوبة هى 40% .

يمكن قياس الرطوبة النسبية بطرق أخرى غير تعيين نقطة الندى . وتعتمد احدى الطرق الشائعة ، وهى **طريقة البصيلة المخضلة والبصيلة الجافة** ، على أساس أن السوائل تسبب تأثيرا تبريديا عندما تتبخر (نتيجة لامتصاص حرارة التبخير) وأن التبخير يتوقف عندما يكون البخار مشبعا ، ومن ثم إذا قورنت قراءة ترمومتر جاف بقراءة ترمومتر موضوع حول بصيلته قطعة مبللة من القماش ، فإن قراءة الترمومتر ذى البصيلة المبللة تكون دائما أقل من قراءة الترمومتر ذى البصيلة الجافة . والفرق بين القراءتين مقياس مباشر للرطوبة النسبية ، فكلما كانت الرطوبة النسبية منخفضة ، كلما كان الفرق بين قراءتى الترمومترين كبيرا . وقد جهزت جداول خاصة تربط الرطوبة النسبية بهذا الفرق بين درجتى الحرارة بحيث يحتاج الشخص فقط إلى قراءة الترمومترين لكى يمكنه تعيين الرطوبة النسبية .

وتسبب الرطوبة النسبية العالية فى الصيف ضيقا شديدا لنا ، وهذا راجع لأننا نعرق فى الصيف وأن تبخر العرق يبرد سطح الجلد . فإذا كانت الرطوبة النسبية 100% فلن يحدث أي تبخر للعرق ، وبالتالى لن يحدث أى تبريد لسطح الجلد . وهذا هو السبب فى ان إحساسنا بالحرارة أقل فى المناخ الجاف منه فى المناخ الرطب .

ملخص

عند رفع درجة حرارة الجسم تزداد طاقته الداخلية . الطاقة الداخلية U للجسم هى الطاقة الكلية الكامنة فى الجسم . تحتوى هذه الطاقة على طاقة الحركة ، والطاقة الاهتزازية والكيميائية والنووية وجميع الصور الأخرى من الطاقة التى تملكها الجسيمات التى تكون الجسم .

الطاقة التى تنقل من جسم درجة حرارته عالية إلى آخر درجة حرارته منخفضة بسبب الفرق بين درجتى الحرارة تسمى الطاقة الحرارية . تمثل الطاقة الحرارية بالكمية ΔQ . تنساب الطاقة الحرارية تلقائيا من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة وليس العكس .

الوحدات المستخدمة عادة لقياس الطاقة الحرارية هى السعر و Btu (و . ج . ب) . ترتبط هاتان الوحدتان بالجول بالعلاقتين 1 cal = 4.184 J و 1 Btu = 1054 J . علاوة على ذلك 1 Btu = 252 cal . يستخدم المتخصصون فى التغذية السعر الكبير (كيلوكالورى) وهو يسمى أيضا السعر .

من التعريف ، السعة الحرارية النوعية لمادة c هى الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتل من المادة درجة واحدة . وفى صورة معادلة ، $Q = cm \quad T$ حيث ΔQ كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كتلة من المادة قدرها m بمقدار ΔT .

عند التعامل مع الغازات تعطى عادة حرارتان نوعيتان . تستخدم السعة الحرارية النوعية c_V عندما يحدث تغير درجة الحرارة عند ثبوت الحجم . وتستخدم الكمية c_p عندما يكون الضغط ثابتا . c_p أكبر دائما من c_V لأن كمية من الطاقة الحرارية تستهلك فى بذل الشغل الناتج من زيادة الحجم فى حالة ثبوت الضغط .

الطاقة اللازمة لتبخير وحدة الكتل من مادة تسمى حرارة التبخير H_v . تنطلق نفس الكمية من الحرارة عند تكثف وحدة الكتل من البخار . بالمثل ، الطاقة اللازمة لصهر وحدة الكتل من المادة المتبلورة هى حرارة الانصهار H_f . تنطلق كمية مساوية من الحرارة عند تبلور وحدة الكتل من حالة الانصهار .

عندما يوجد السائل متلامسا مع بخاره عند درجة حرارة ثابتة فإن ضغط توازن البخار يسمى ضغط البخار المشبع ، وتزدادا قيمته مع درجة الحرارة . عند ارتفاع درجة حرارة السائل يزداد ضغط البخار المشبع حتى يتساوى عند درجة حرارة عالية معينة مع الضغط الخارجى على السائل . وعند هذه الدرجة تتكون فقاعات البخار وتنمو فى السائل . ويقال عندئذ أن السائل يغلى .

إذا تغيرت درجة حرارة جسم طوله الأصلى L بمقدار ΔT فإن الطول سوف يتغير بمقدار ΔL يعطى بالعلاقة $\Delta L/L = \alpha \, \Delta T$. الكمية α هى معامل التمدد الحرارى الطولى . بالمثل ، إذا تغيرت درجة حرارة جسم حجمه الابتدائى V بمقدار ΔT فإن الحجم سوف يتغير بمقدار ΔV . يعرف معامل التمدد الحرارى الحجمى γ بالعلاقة $\Delta V/V = \gamma \, \Delta T$

يمكن أن تنتقل الحرارة بثلاثة طرق . فى حالة التوصيل ، تنتقل الطاقة من ذرة إلى أخرى (أو من جسيم إلى آخر) بالتصادم . وحركة الجسيمات ليست بعيدة المدى . أما فى حالة الحمل فإن الجزيئات ذات الطاقة العالية تنساب على هيئة تيار وتحمل الطاقة الحرارية معها . وتتحرك الجسيمات عندئذ مسافات طويلة تقارن بالمسافات التى تنتقل الحرارة خلالها . وفى الإشعاع تنتقل الحرارة خلال الفراغ . وهذه هى الطريقة التى تنتقل بها الطاقة فى الضوء أو موجات الراديو .

الرطوبة النسبية هى النسبة بين كتلة بخار الماء لوحدة الحجوم فى الهواء وكتلة بخار الماء لوحدة الحجوم اللازمة للتشبع عند نفس درجة الحرارة . يستطيع الهواء حمل كمية أكبر من البخار فى وحدة الحجوم عند درجة الحرارة العالية عنها فى درجة الحرارة المنخفضة . عند تبريد الهواء بدرجة كافية يمكن الوصول إلى درجة حرارة يصبح فيها البخار مشبعا . تسمى هذه الدرجة نقطة الندى . يتكون نوع من الترسب عند درجات الحرارة المنخفضة عن نقطة الندى .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية :

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – التفرقة بين المصطلحات : الطاقة الحرارية (Thermal energy) ، والطاقة الداخلية ، والطاقة الحرارية (Heat energy) بشرح معنى كل منها .

٢ – ذكر اتجاه سريان الحرارة عندما يتلامس جسمان معلوم درجة حرارتهما .

٣ – ذكر معنى وحدات السعر و Btu (أ) بالإشارة إلى قيمتهما بالجول ، (ب) بالإشارة إلى الطاقة الحرارية اللازمة لتسخين الماء . شرح العلاقة بين السعر والسعر الكبير .

٤ – تعريف السعة الحرارية النوعية بالألفاظ وفى صورة معادلة . ذكر قيمتها للماء .

٥ – استخدام المعادلة $\Delta Q = cm\,\Delta T$ لحل المسائل البسيطة المتعلقة بتسخين وتبريد الأجسام .

٦ – شرح لماذا يجب أن تكون c أكبر للمادة المكونة من جزيئات معقدة منها للغاز أحادى الذرة .

٧ – شرح لماذا تختلف c_v عن c_p للغاز .

٨ – تعريف المصطلحات التالية وذكر العلاقة بينها : ضغط البخار المشبع ، درجة الغليان ، حرارة التبخير ، التبخر ، التبريد نتيجة للتبخر .

٩ – وصف كيفية تغير درجة حرارة مادة متبلورة كدالة فى الزمن عند تسخينها ببطء إلى درجة الغليان وانصهارها وتسخينها فوق هذه الدرجة ثم تبخرها مع توضيح تأثيرات حرارة الإنصهار وحرارة التبخير .

١٠ – وصف مايحدث لدرجة غليان سائل عندما يتغير الضغط الخارجى فوقه .

١١ – حل المسائل البسيطة المتعلقة بقياس كمية الحرارة التى تماثل الأمثلة التوضيحية من ١١ – ٤ إلى ١١ – ٧ .

١٢ – حساب التمدد الحرارى الطولى لقضيب أو الحجمى عندما يكون معامل التمدد الحرارى المناسب معلوما أو حساب معامل التمدد الحرارى بمعلومية نتائج تجربة تمدد .

١٣ – تعيين كمية الحرارة المنتقلة خلال بلاطة من المادة عندما تكون درجة حرارة كل من وجهيها معلومة . افترض أن الموصلية الحرارية للمادة معلومة .

١٤ – ذكر الطرق الثلاث التى تنتقل بها الحرارة وشرح كل منها .

١٥ – تعريف الرطوبة النسبية ونقطة الندى . حساب RH عندما تكون نقطة الندى (أو تركيز بخار الماء) ودرجة حرارة الهواء معلومتين افترض أن لديك جدولا كالجدول ١١ – ٧ . اشرح لماذا تعتبر RH عاملا فى تبريد الجسم بالتبخير أو العرق .

مصطلحات وعبارات عامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الطاقة الداخلية U.

الطاقة الحرارية ΔQ

السعة الحرارية النوعية c

$\Delta Q = cm\,\Delta T$

السعر ، Btu ، السعر الكبير

c_p أكبر من c_v

ضغط البخار المشبع

التبخر والغليان

حرارة التبخير وحرارة الانصهار

الغليان تحت ضغط منخفض

$\Delta V/V = \gamma \Delta T$ و $\Delta L/L = \alpha \Delta T$

التوصيل الحرارى ، الحمل الحرارى ، الإشعاع الحرارى

قانون نيوتن للتبريد

الرطوبة النسبية

نقطة الندى

بخار فوق مشبع

اسئلة وتخمينات :

١ – بالرغم من أن جزيئات غاز الأرجون (Ar) وجزيئات غاز الاكسجين (O_2) لهما تقريبا نفس الكتلة الجزيئية ، فإن الطاقة اللازمة لتسخين الاكسجين ضعف الطاقة اللازمة لتسخين الأرجون تقريبا . اشرح على أساس الطاقة الداخلية للغازين لماذا تعتبر هذه النتيجة متوقعة .

٢ – فى احدى التجارب العملية اعطى طالب ابريق ترموس يحتوى على مادة مجهولة درجة حرارتها T_1 ، ثم أضيفت كمية من الحرارة ΔQ بإضافة الماء الساخن اليها . وبعد أن تحقق التوازن وجد أن درجة الحرارة لازالت T_1 ، فاستنتج الطالب أن الحرارة النوعية للمادة الموجودة فى دورق الترموس لانهائية . اشرح لماذا تقتضى التجربة أن تكون $c = \infty$. ماهو التفسير المحتمل لهذه النتائج العملية ؟

٣ – هل يمكن أن تضاف الحرارة إلى شىء ما بدون أن تتغير درجة حرارته ؟ ماذا إذا كان هذا « الشىء » غازا ، سائلا أو جامدا ؟ اشرح .

٤ – اشرح لماذا تكون c_p للغاز أكبر من c_V .

٥ – ينصهر نوع معين من الشمع عند درجة 60°C . صف تجربة لتعيين حرارة انصهار الشمع .

٦ – كيف يمكن حساب الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مخلوط من وزنين معلومين لغازين بمقدار 10°C ؟

٧ – يمكن جعل الماء يغلى بشدة بتبريد قارورة من الماء لحمت عندما كان الماء يغلى عند درجة 100°C اشرح لماذا ؟

٨ – يغلى الكلور السائل عند درجة 30°C تحت ضغط قدره 8.60 atm . أين يوجد مثل هذا النوع من البيانات ؟ كن محددا .

٩ – فى أية وجوه تختلف الأرض إذا كان الماء ينكمش عند التجمد ؟

١٠ – لماذا يجب أن يبرد الغاز أكثر عندما تتمدد بمقدار ΔV بدفع كباس إلى الخارج منه فى حالة ماإذا تمدد الغاز فى غرفة تفريغ حجمها ΔV ؟

١١ – لماذ نحس بأن قطعة من الصلب أبرد من قطعة من الخشب عند نفس درجة الحرارة ؟

١٢ – ماذا يحدث إذا كانت الأرض مغطاة بطبقة كثيفة من الضباب المحمل بالدخان بحيث لاتستطيع أشعة الشمس أن تصل إلى سطحها ؟

١٣ – قدر الإرتفاع فى درجة حرارة الجسم البشرى فى 1 day إذا احتفظ بالطاقة الحرارية التى يحصل عليها من الغذاء فى يوم واحد وقدرها 2600 سعر كبير (كيلوكالورى) تقريبا . قيمة c للشخص تساوى حوالى 0.83 cal/(g)(°C) . (ق)

١٤ – من المعروف أن الغرفة المليئة بالناس تصبح حارة جدا مالم تهو بطريقة مناسبة . بفرض أن الشخص يطلق كمية من الحرارة تكافىء طاقة الغذاء بطريقة منتظمة خلال اليوم ، قدر الإرتفاع فى درجة حرارة فصلك فى 1 h إذا لم يكن هناك أى فقدان للطاقة من الفصل . (ق)

١٥ – ماهى كمية الماء بالتقريب التى يجب أن تتبخر من سطح جلد رجل متوسط الحجم لكى يبرد جسمه بمقدار 1°C ؟ إلى أى مدى تتفق هذه النتيجة مع ما سمعته عن تأثير العرق على الجسم ؟ $[C_{body} \approx 0.83$ cal/(g)(°C)] . (ق)

١٦ – إذا تعرض الثلج لضغط كبير فإن نقطة تجمده تنخفض عن O°C . وبطريقة تقريبية ، تنخفض نقطة الانصهار حوالى 5°C لكل زيادة فى الضغط المطبق قدرها 6000 N/cm² . قدر نقطة انصهار الثلج تحت مزلجة المتزحلق . (ق)

مسائل :

١ – (أ) ماعدد السعرات من الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة 10 g من الرصاص من 20°C إلى 100°C ؟ (ب) وماعدد الوحدات الحرارية البريطانية Btu التى تكافىء هذه السعرات ؟

٢ – (أ) إذا بردت 20 g من النحاس من 80°C إلى 30°C ، فما عدد السعرات من الحرارة المنطلقة نتيجة لذلك ؟ (ب) وماعدد الوحدات الحرارية البريطانية Btu التى تكافىء هذه السعرات ؟

٣ – (أ) ماعدد الوحدات الحرارية البريطانية Btu اللازمة لتسخين 3.0 lb من الرصاص من 70°F إلى درجة الانصهار وهى حوالى 590°F ؟ (ب) ماعدد السعرات التى تكافىء هذه الوحدات الحرارية البريطانية ؟

٤ – يستهلك شخص كتلته 70 kg حوالى 2500 سعرا كبيرا ، أى حوالى 2.5×10^6 cal ، من الغذاء يوميا . إذا تحولت هذه الطاقة الغذائية بأكملها إلى حرارة بدون فقد أى جزء ولو ضئيل منها ، فما مقدار الإرتفاع فى درجة حرارة جسم هذا الشخص ؟

٥ – يجلس خمسون شخصا فى غرفة مستطيلة ابعادها $3.5\times10\times10$ m³ . وفى المتوسط يستهلك كل شخص يوميا 2500 سعرا كبيرا ويفقد $1/24$ من هذه الكمية فى كل ساعة . مامقدار الإرتفاع فى درجة حرارة الغرفة فى 1 h نتيجة لهذه الطاقة الحرارية ؟ افترض للتبسيط أن الهواء يتكون من النتروجين N_2 وأن كثافته 1.29 kg/m³ . اهمل الحجم الذى يشغله الناس . افترض أن الهواء راكد وأن الحرارة لاتفقد عن طريق الجدران أو النوافذ وأن حجم الهواء ثابت .

٦ – ماعدد السعرات من الحرارة اللازمة لتحويل 30 g من الثلج عند −5°C إلى ماء درجة حرارته 20°C ؟

٧ – ماهى كمية الثلج ذات درجة الحرارة O°C اللازمة لتبريد 250 g من الماء من درجة 25°C إلى O°C ؟

٨ – أسقط مكعب من الثلج (درجة حرارته O°C) كتلته 18 g فى كوب يحتوى على 150 g من الكوكا (Coke) درجة حرارتها 25°C . ماهى درجة الحرارة النهائية للكوكا بعد انصهار الثلج بفرض ان التبادل الحرارى مع الكوب مهمل ؟

٩ – صبت كمية من الرصاص المنصهر كتلتها 40g ودرجة حرارتها 327°C فى تجويف بقالب من الثلج . ما هى كمية الثلج المنصهرة ؟ افترض تحقق توازن درجة الحرارة مع قالب الثلج .

١٠ – ما هى كمية العرق التى يجب أن تتبخر من جسم طفل كتلته 50 kg لكى تنخفض درجة حرارته بمقدار 2°C ؟ حرارة تبخير الماء عند درجة حرارة الجسم تساوى 580 cal/g تقريبا .

١١ – متوسط الطاقة التى تصل إلينا من الشمس فى الثانية هو 0.134 J/cm^2 ، وتمتص معظم هذه الطاقة أثناء مرورها فى الغلاف الجوى للأرض . افترض أن 0.1%من هذه الكمية تصل إلى سطح بحيرة وتستهلك فى تبخير مائها . ماهى كمية الماء المتبخرة من 1m² من السطح فى يوم واحد ؟ استخدم $H_v = 590$ cal/g .

١٢ – عندما يتبخر سائل طيار كالكحول أو الاثير من جلدك يحدث تبريد محسوس . افترض أن 0.020 g من ثانى كلوريد الإيثان قد تبخر من مساحة قدرها 1 cm² من جلدك فبرد طبقة سطحية سمكها 0.035 cm . (أ) مامقدار الانخفاض فى درجة الحرارة ؟ افترض أن c للجلد تساوى 0.75 cal/(g)(°C) وأن كثافتة 0.95 g/cm³ . إهمل إمكانية حدوث تغير فى طور الجلد . اعتبر أيضا أن قيمة c لثانى كلوريد الإيثان صغيرة جدا ويمكن اهمالها . (ب) لماذا لاتقل درجة حرارة الجلد بنفس المقدار المحسوب ؟ ($H_v \approx 85$ cal/g)

١٣ – أثبتنا سابقا أن $c_p - c_v = R/M$ فى حالة الغاز المثالى . إحسب الكمية $(c_p - c_v)M$ لكل من الغازات الحقيقية المدرجة فى الجدول ١١ – ٢ باستخدام البيانات المعطاه فى هذا الجدول . للمقارنة $\bar{R} = 8314$ J/(kg mol)(K) . قيم M للغازات (بنفس الترتيب كما فى الجدول ، هى 4.0 ، 40 ، 32 ، 28 ، 44 ، 18 ، 16 .

١٤* – حبس غاز فى أسطوانة رأسية بواسطة كباس وزنه 10 N كما هو مبين فى الشكل ١١ – ٣ . وعندما كان النظام فى درجة 20°C استقر الكباس ساكنا على ارتفاع معين فى الأسطوانة . وبعد التسخين إلى درجة 100°C ارتفع الكباس 20 cm . بأى مقدار تزيد كمية الحرارة اللازمة لتسخين الغاز فى الوعاء من 20°C إلى 100°C تحت ضغط ثابت عنها تحت حجم ثابت ؟ افترض أن الغاز مثالى .

١٥ – اسقطت قطعة من الرصاص كتلتها 100 g ودرجة حرارتها 100°C فى مسعر من النحاس كتلته 50 g يحتوى على 50 g من الماء عند درجة 20°C . ماهى درجة الحرارة النهائية ؟

١٦ – اسقط 20 g من الثلج درجة حرارتها -10°C فى مسعر من النحاس يحتوى على 100 g من الماء عند درجة 35°C . ماهى درجة الحرارة النهائية؟

١٧ – ماهى كمية بخار الماء (ودرجة حرارته 100°C) اللازمة لتحويل 40 g من الثلج درجة حرارته عند -10°C إلى ماء درجة حرارته 30°C إذا كان الثلج موجودا فى مسعر من النحاس كتلته 50 g ؟

١٨ – مسعر من النحاس [c=0.20 cal/(g)(°C)] كتلته 70 g يحتوى على 400 g من الماء و 100 g من الثلج فى حالة توازن حرارى . أضيف إلى محتويات المسعر قطعة ساخنة من المعدن [c=0.10 cal/(g)(°C)] كتلتها 300 g ودرجة حرارتها مجهولة ، وكانت درجة الحرارة النهائية 10°C . ماهى درجة الحرارة الابتدائية للمعدن .

١٩ – مسعر نحاسى مكافئه المائى 5.9 g ، أى أن المسعر يتصرف أثناء التبادل الحرارى ككمية من الماء كتلتها 5.9 g . يحتوى هذا المسعر على 40 g من الزيت درجة حرارتها 50°C . وعندما أسقطت 100 g من الرصاص درجة حرارتها 30.0°C . أصبحت درجة حرارته النهائية 48.0°C . ماهى السعة الحرارية النوعية للزيت ؟

٢٠ – يغلى البنزين عند حوالى 80°C . مرر بخار بنزين درجة حرارته 80°C فى مسعر مكافئه المائى 20 g (انظر المسألة ١٩) يحتوى على 100 g من الزيت [c=0.50 cal/(g)(°C)] درجة حرارته 20°C . وبعد أن تكثفت 7.0 g من البنزين أصبحت درجة الحرارة النهائية 30°C . ماقيمة حرارة تبخير البنزين ؟ c للبنزين تساوى [0.40 cal/(g)(°C)] .

٢١ – اضيف 150 g من الثلج درجة حرارته O°C إلى 200 g من الماء فى فنجان من الالمنيوم كتلته 100 g ، وكانت درجة حرارة الفنجان والماء 30°C . ماهى درجة الحرارة النهائية ؟

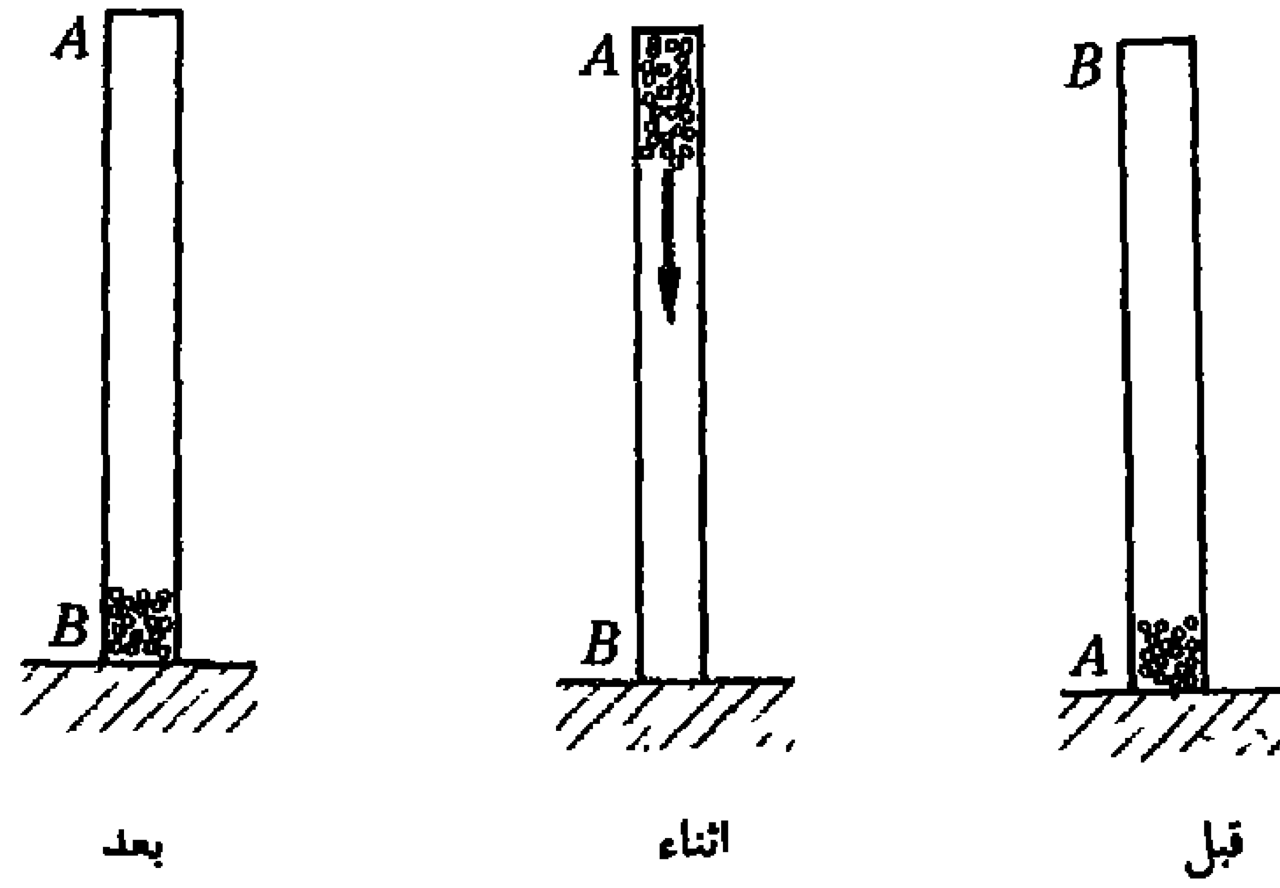
٢٢ – رصاصة معينة كتلتها 6.0 g ونقطة انصهارها 300°C وسعتها الحرارية النوعية 0.20 cal/(g)(°C) وحرارة انصهارها 15 cal/g . (أ) ماهى كمية الحرارة اللازمة لصهر هذه الرصاصة إذا كانت درجة حرارتها الابتدائية O°C ؟ (ب) ماهى أقل سرعة يمكن أن تسير بها الرصاصة إذا اريد أن تنصهر بمجرد إيقافها ؟

٢٣* – تستقر كتلة قدرها m من خردق الرصاص فى قاع أسطوانة من الكرتون طولها L وحدة ، كما هو مبين فى الشكل م ١١ – ١ . وعندما تقلب الأسطوانة رأسا على عقب بسرعة فإن الخردق يسقط فيها إلى القاعدة الجديدة . اثبت أن الارتفاع فى درجة حرارة الخردق بعد قلب الأسطوانة n مرة يعطى بالعلاقة :

$$\Delta T = \frac{ngL}{c_{\text{Pb}}J}$$

حيث J المكافئ الميكانيكى للحرارة ، أى عدد الجولات التى تكافئ 1 cal ، g تسارع الجاذبية .

٢٤ – طريق مستقيم مصنوع من ألواح خرسانية موضوعة طرفا لطرف ، وطول كل لوح 25 m . ماهو عرض فجوة التمدد بين كل لوحين عند درجة 20°C إذا كانا متلامسين عند درجة 45°C ؟



٢٥ – وضعت العلامات على شريط قياس من الألمنيوم عندما كانت درجة الحرارة 25°C: ما هو الخطأ المئوى الناتج من الانكماش إذا استخدمت المسطرة فى درجة -5°C ؟

٢٦ – برطمان سلاطة ذو غطاء من الالمنيوم من النوع الملولب . وعند درجة 20°C يكون الغطاء محكما بحيث لا يمكن فتحه . بأى كسر يجب أن يتمدد قطر الغطاء إذا سخن إلى درجة 85°C تحت صنبور للماء الساخن ؟ لماذا لا يجب أن يسخن الغطاء أطول من اللازم ؟

٢٧ – تستخدم طريقة« توافق الانكماش » فى الورش الميكانيكية على نطاق واسع لتركيب القضبان الأسطوانية فى ثقوب بالعجلات والقوالب والألواح . لنفرض أننا نريد تركيب قضيب قطره 2.000 cm فى فتحة قطرها 1.985 cm فى قالب من النحاس الأصفر . إلى أى درجة حرارة يجب تسخين القالب بحيث يتوافق القضيب مع الفتحة ؟

٢٨ – قارورة من الزجاج المقاوم للحرارة مدرجة لتحمل $100\ cm^3$ تماما فى درجة 20°C ماهو الحجم الذى تحمله عند درجة 30°C ؟
تلميح : تتمدد القارورة المجوفة كما لو كانت مصمتة تماما .

٢٩ – ملأت قارورة حجمية سعتها $100\ cm^3$ بالبنزين فى درجة 30°C . ماهى كمية البنزين الواجب اضافتها لكى تمتلأ تماما إذا بردت القارورة إلى درجة 20°C ؟ (اهمل تمدد القارورة) .

٣٠** – عمود حديدى طوله 10 ft مدفون طرفاه فى قائمين من الخرسانة . فإذا كانت درجة الحرارة عند تجهيز هذا الهيكل هى 35°F ، فما هى القوة التى يؤثر بها العمود على القائمين عندما تكون درجة حرارته 98°F ؟ مساحة مقطع القائم $10\ in^2$

٣١** – لحمت فوهة قارورة زئبق عند درجة 20°C بحيث كانت مملوءة تماما بالزئبق اوجد الضغط داخل القارورة عند درجة 100°C . اهمل تمد الزجاج ($k_{Hg} = 2.5 \times 10^{-6}\ in^2/lb$) .

٣٢** – اثبت أن معامل التمدد الحجمى فى حالة الغاز المثالى يساوى $1/T$ بشرط حدوث التمدد عند ثبوت الضغط .

٣٣ – وضع أحد طرفى قضيب من النحاس الأصفر طوله 0,50m ونصف قطره 0.5cm فى درجة حرارة 100°C ووضع الآخر فى درجة 20°C ، ما هى كمية الحرارة التى تسرى فى القضيب فى زمن قدره 1s ؟ افترض أن جوانب القضيب معزولة .

٣٤ – استخدام لوح من الاسبستوس سمكه 2.0mm كفاصل بين لوحين من النحاس الأصفر درجة حرارة احدهما 100°C ودرجة حرارة الآخر 20°C . ماهى كمية الحرارة المارة خلال مساحة قدر $40\ cm^2$ من أحد اللوحين إلى الآخر فى 1h ؟

٣٥* – تحمل ماسورة من النحاس الأصفر سمكها 0.25 cm وقطرها 10 cm بخار ماء درجة حرارته 100°C إلى راقود للماء الدائر درجة حرارته 20°C . ماهى كمية الحرارة المفقودة لكل متر من الماسورة فى الثانية ؟

٣٦ – وضعت شريحة من المطاط سمكها 0.10 cm بين لوحين من النحاس الأصفر سمك كل منها 0.50 cm . وحفظ السطح الخارجى لأحد اللوحين فى درجة 0°C ، بينما حفظ السطح الخارجى للآخر فى درجة 100°C . اوجد درجتى حرارة سطحى شريحة المطاط .

٣٧ – إثبت أن قانون ستيفان للتبريد يؤول إلى قانون نيوتن للتبريد إذا كان $(T_1 - T_0)/T_0 \ll 1$

٣٨* – غرفة مغلقة حجمها $500\ m^3$ ودرجة الحرارة فيها 24°C . والرطوبة داخلها 95% شغل مزيل الرطوبة فى هذه الغرفة لتقليل الرطوبة فيها . بفرض عدم تغير درجة الحرارة ، ماهى كتلة الماء الواجب إزالته لكى تنخفض الرطوبة إلى 40% ؟

٣٩ – وجد فى أحد الأيام أن الماء يتكثف على كوب ماء عندما تكون درجة حرارة الماء فيه 16°C أو أقل . فإذا كانت درجة حرارة الغرفة 20°C ، اوجد (أ) كمية الماء فى وحدة الحجوم من الهواء ، (ب) الرطوبة النسبية .

٤٠ – إذا كانت درجة حرارة الهواء 90°F والرطوبة النسبية 80% ، فالى أى درجة يمكن تبريد زجاجة مشروب خفيف بحيث لايتكثف الماء عليها ؟

٤١ – كان شخص يرتدى نظارة خارج منزله لفترة ما فى يوم كانت درجة حرارة الهواء فيه 4°C- . ماهى أقل قيمة للرطوبة النسبية RH فى المنزل بحيث لايتكون الضباب على زجاج النظارة ؟ افترض أن درجة حرارة المنزل 20°C .

الفصل الثانى عشر

الديناميكا الحرارية

قبل معرفة طبيعة الذرات والجزيئات بوقت طويل تمكن العلماء من استنباط طريقة فعالة ومناسبة لمناقشة الحرارة والشغل والطاقة الحرارية . وتتضمن هذه الطريقة وصف المادة بدلالة الخواص الإجمالية كالضغط ودرجة الحرارة والحجم وسريان الحرارة . وهذه الطريقة لوصف سلوك الأجسام والمواد تسمى **الديناميكا الحرارية** . واليوم ، وبالرغم من أننا نفهم جيدا كيفية سلوك الذرات والجزيئات ، فإن الديناميكا الحرارية تستخدم على نطاق واسع فى جميع فروع العلم . وفى هذا الفصل سوف نعطى مقدمة عن هذا المجال الهام والفعال من مجالات الدراسة .

١٢ - ١ متغيرات الحالة

فى الديناميكا الحرارية نناقش عادة سلوك مجموعة محددة من الجزيئات نسميها **النظام** . وقد يكون النظام هو جزيئات الغاز فى وعاء ، والجزيئات فى محلول ، كما قد يكون النظام معقدا كجزيئات شريط من المطاط . ولكى تكون المناقشة الدينامية الحرارية ذات معنى يجب أن يكون النظام محددا تماما . وفى هذه الحالة فقط يمكننا أن نعطى وصفا واضحا له .

ولوصف النظام تستخدم كميات معينة تنطبق على نظام بأكمله أو على جزء محدد منه . فالضغط ودرجة الحرارة والحجم هى كميات نموذجية تستخدم على نطاق واسع فى وصف النظام ويمكن قياسها بسهولة . وفى الديناميكا الحرارية تستخدم أيضا كميات أخرى كالطاقة الداخلية والحرارة والشغل و كمية أخرى سوف نقابلها فيما بعد تسمى الانتروبيا . وإذا تغيرت حالة النظام فإن هذه الكميات قد تتغير . ومن الضرورى أن نعلم أى الكميات هى المناسبة لتمثيل الحالة الصحيحة للنظام . لنتعرف الآن على هذه الكميات .

عندما يصل غاز فى وعاء إلى التوازن يصبح للغاز درجة حرارة وضغط وحجم معينين . ويعكس قانون الغاز المثالى هذه الحقيقة ، إذ أنه يخبرنا أن $PV = nRT$. وواضح من هذا القانون أنه إذا كان أى متغيرين من هذه المتغيرات الثلاثة معلومين ، فإن المتغير الثالث يمكن حسابه ، أى أنه يعتبر معلوما أيضا . ويسمى هذا الموقف المعين ، الذى يكون للغاز (النظام) فيه قيم محددة للمتغيرات P ، V ، T **حالة النظام** . ومتى عاد النظام إلى نفس هذه القيم للمتغيرات P ، V ، T ، فإن حالة النظام ستعود كما كانت أصلا . وبالرغم من أن كل جزىء فى النظام قد لاينفعل نفس الشىء كالجزيئات الأخرى ، فإن النظام يبدو متماثلا فى القياسات الماكروسكوبية .

متغيرات الحالة

هناك سمات معينة للنظام لاتتغير أبدا عندما يكون النظام فى حالة معينة ، وتسمى المتغيرات التى تصف هذه السمات **متغيرات الحالة** فمثلا ، تعتبر المتغيرات P ، V ، T متغيرات حالة للنظام . وبصرف النظر عن الطريقة التى يصل بها النظام إلى حالة معينة ، تظل قيمة كل من الضغط والحجم ودرجة الحرارة ثابتة دائما . فمثلا ، يمكننا اعتبار الغاز الموجود فى إطار السيارة كنظام . وفى هذه الحالة تكون قيم كل من P ، V ، T متماثلة فى الحالات المتماثلة طالما لم يكن هناك أى تسرب للغاز من الإطار ، ولا يمثل تاريخ الغاز فى الإطار أية اهمية فى هذا الشأن . إذن ، تتميز كل حالة معينة من حالات النظام بنفس قيم متغيرات حالته P ، V ، T دائما .

رأينا مما سبق أن الضغط والحجم ودرجة الحرارة متغيرات حالة ، ولكن ليست جميع الكميات التى تصف النظام متغيرات حالة . فالشغل ، مثلا ، ليس متغير حالة ، إذ لايمكن أن تنسب كمية محددة من الشغل للغاز الموجود فى إطار عجلة سيارة (أى النظام) . فعندما يصل الغاز فى اليوم التالى إلى نفس حالته اليوم لن يكون هناك أى تأكيد بأن الغاز لم يبذل أى شغل فى ذلك الوقت . ومن ثم فإن « محتوى شغل » الغاز كمية ليس لها معنى محدد تماما . إذن ، الشغل ليس متغير حالة .

بالمثل ، الحرارة ليست متغير حالة . فالغاز فى الإطار يمكن تسخينه بكثير من الطرق لاتتضمن جميعها سريان الحرارة إلى الغاز . وبالرغم من أن الشمس يمكن أن تزود الإطار بالحرارة وتؤدى إلى تسخينه ، فإن الفعل الميكانيكى أيضا يمكن أن يغير درجة حرارة الإطار . فمثلا ، إذا كانت السيارة تتحرك بسرعة كبيرة ، فإن إطارها يصبح ساخنا جدا حتى ولو كان الطقس باردا بدرجة كبيرة . نرى من ذلك أن درجة الحرارة لاتعرفنا بالضرورة ماهى كمية الحرارة التى انتقلت إلى الغاز لكى يصل إلى هذه الدرجة . وعليه فإن مصطلح « المحتوى الحرارى » للغاز ليس معنى محدد تماما . هذا لأن الحرارة تكون ذات معنى فقط إذا كانت الطاقة تنتقل نتيجة لفرق فى درجة الحرارة . إذن ، الحرارة ليست متغير حالة .

ناقشنا أيضا مفهوم الطاقة الداخلية لمادة ، ورأينا أنها تتكون من جميع أنواع الطاقة الكامنة فى المادة . وحيث أن الطاقة محفوظة ، يمكننا إعداد موازنة لها ، كما فى علوم المحاسبة التجارية . من هذا نرى أن الطاقة الداخلية للنظام كمية محددة تماما . لذلك إذا اخبرتنى ماهى الطاقة الداخلية لنظام ما اليوم ، يمكننى (من ناحية المبدأ على الأقل) أن أخبرك ماهى طاقته الداخلية فى وقت لاحق . كل ماأحتاجه هو أن أقيس التغيرات التى تحدث فى طاقة النظام فى تلك الفترة ، وبعد ذلك أقوم — كمحاسب ماهر — بإيجاد إجمالى ميزانية الطاقة وأخبرك ماهى الطاقة الداخلية للنظام فى ذلك الوقت . إذن ، الطاقة الداخلية متغير حالة .

١٢ – ٢ القانون الأول للديناميكا الحرارية

القانون الأول للديناميكا الحرارية هى احدى ركيزتين اساسيتين يرتكز عليهما علم الديناميكا الحرارية بأكمله . وفى الحقيقة فإن أول المؤسسين لعلم الديناميكا الحرارية هم الباحثون الأوائل فى مجال بقاء الطاقة أيضا . وعندما يصاغ

* تستخدم كلمة « ماكروسكوبى » للإشارة إلى أن القياسات تتعلق بالتأثير المتوسط لبلايين أو أكثر من الجزيئات .

قانون بقاء الطاقة فى صورة عامة لنظام ما ، فإن هذه الصيغة تسمى **القانون الأول للديناميكا الحرارية** . لنتبين الآن كيف توضع هذه الصيغة .

لكل نظام فى حالة معينة كمية محددة من الطاقة الداخلية U . وهذه الطاقة يمكن أن تتكون من بعض أو كل أنواع الطاقة التى تشمل طاقتى الحركة والوضع والطاقتين الكيميائية والنووية . بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن تتغير الطاقة الداخلية للنظام بإحدى طريقتين عامتين : (١) بانتقال الطاقة الحرارية إلى النظام أو منه ، (٢) بأن يبذل النظام شغلا ضد بعض أنواع القوى الخارجية . لتلخيص هذه الحقيقة فى صورة معادلة يجب أن نعرف الكميات الآتية :

الزيادة فى الطاقة الداخلية للنظام = ΔU
الحرارة التى تنتقل إلى النظام = ΔQ
الشغل المبذول بواسطة النظام = ΔW

إذن :

القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \qquad (١٢ - ١)$$

وهذه المعادلة هى صيغة **القانون الأول للديناميكا الحرارية** ، وهى أيضا صيغة لقانون بقاء الطاقة .

عند تطبيق القانون الأول يجب أن نحرص حرصا شديدا فى استخدام الإشارتين + و − . ذلك أن هذا القانون عبارة عن معادلة ميزانية ، ولذلك يجب أن تسجل أرصدة الدائن والمدين بمنتهى العناية . وحسب الإتفاق والعرف المتبعين ، ΔW هى الشغل المبذول بواسطة النظام . وعليه فإن هذه الكمية تؤدى إلى نقص U ، ولذلك فهى تظهر سالبة فى المعادلة (١٢ − ١) . من ناحية أخرى ΔQ هى الحرارة التى تنتقل إلى النظام . لذلك فإنها تسبب زيادة U ، وعليه فإنها تظهر موجبة فى المعادلة (١٢ − ١) .

ينطبق القانون الأول على جميع الأنظمة مهما كانت معقدة . فمثلا ، اعتبر جسمك كنظام ، (ولكى يظل هذا النظام بسيطا لن يسمح لك بالأكل أو الإخراج) . هذا النظام يفقد طاقة داخلية باستمرار بمرور الوقت . ويعتبر الطعام الذى تناولته قبل ذلك جزء من الطاقة الداخلية . وهذه الصورة وكذلك الصور الأخرى من الطاقة الداخلية تستهلك بتقدم النهار . وتفقد معظم هذه الطاقة على هيئة حرارة تنتقل من جسمك إلى الوسط المحيط ، ويفقد النظام جزءا صغيرا من الطاقة

الداخلية عندما يبذل جسمك شغلا على الأجسام المحيطة به . يمكننا إذن كتابة القانون الأول بالنسبة لجسمك بالطريقة الآتية :

– الشغل المبذول – الحرارة المفقودة = – النقص فى الطاقة الداخلية

هل يمكنك أن تشرح لماذا استخدمت الإشارة السالبة فى جميع حدود هذه المعادلة لكى تستطيع ذلك ربما كان من الأفضل أن تعود إلى معنى القانون الأول وليس تطبيق المعادلة (١٢ – ١) مباشرة .

١٢ – ٣ الشغل المبذول أثناء تغير الحجم

فى كثير من التطبيقات العملية للديناميكا الحرارية يقوم النظام ببذل الشغل أثناء تغير الحجم . من الضرورى إذن أن نعلم العلاقة بين الشغل وتغير الحجم . وللتبسيط ، اعتبر النظام المبين فى الشكل ١٢ – ١ الذى يمثل كمية من الغاز فى اسطوانة مغلقة بكباس . سنحاول الآن حساب كمية الشغل الذى يبذله الغاز عندما يتمدد ويدفع الكباس إلى أعلى قليلا .

وإذا كانت إزاحة الكباس صغيرة فإن ضغط الغاز لن يتغير كثيرا . وعليه ، فإن القوة التى يؤثر بها الغاز على الكباس تعطى – من تعريف الضغط – بالعلاقة الآتية :

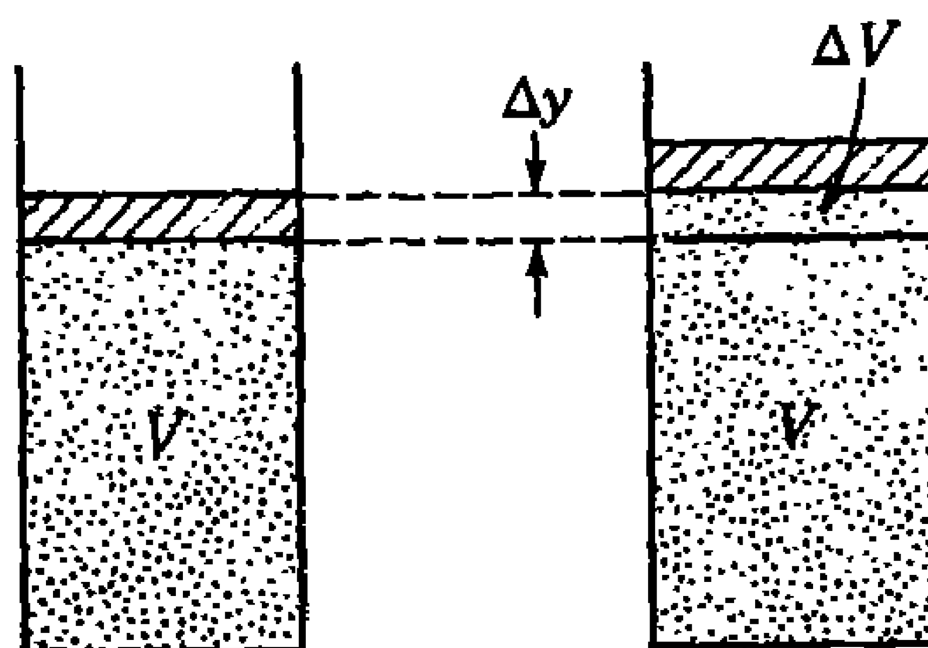
$$P = \frac{F}{A}$$

أو :

$$F = PA$$

حيث A مساحة سطح الكباس . وإذا كانت الإزاحة الصغيرة هى Δy ، فإن الشغل المبذول بواسطة الغاز على الكباس هو :

$$\Delta W = (\text{القوة} \times \text{المسافة}) \cos\theta$$
$$= (PA)(\Delta y)(1) = P(A\,\Delta y)$$



شكل (١٢ – ١)
إذا كانت مساحة الكباس هى A ، فإن $\Delta V = A\,\Delta y$

ولكن الكمية $A\,\Delta y$ هى ببساطة الزيادة فى حجم الغاز ΔV . إذن :

الشغل المبذول أثناء التمدد

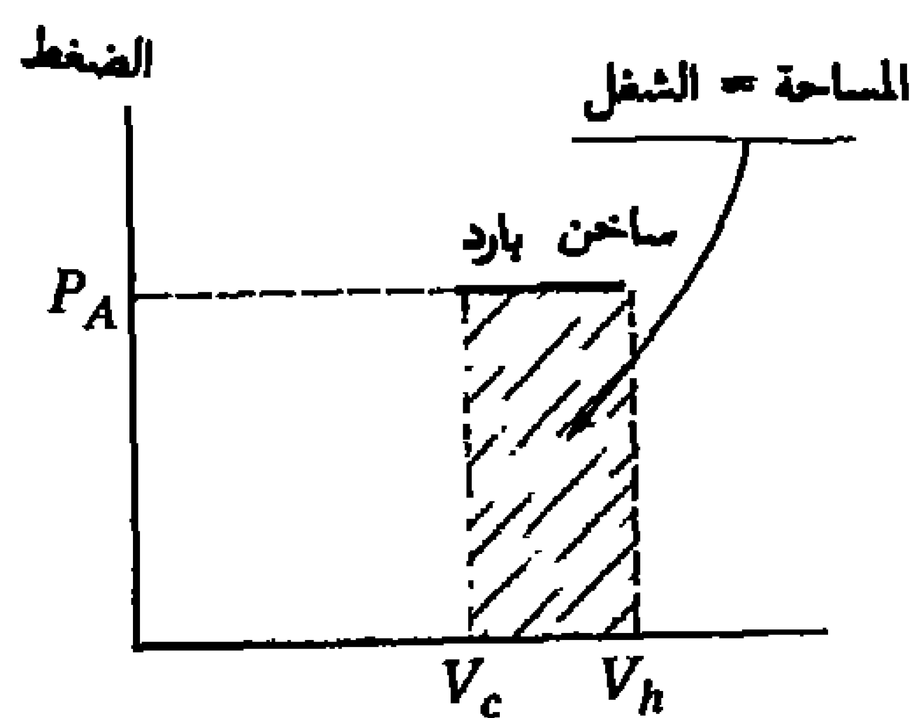
$$\Delta W = P\,\Delta V \qquad (١٢ - ٢)$$

تنطبق المعادلة (١٢ - ٢) على أى نظام يظل ضغطه P ثابتا أثناء التغير الحجمى ΔV . ويعطى الشغل الذى يبذله النظام أثناء تمدده بمقدار ΔV ضد ضغط قدره P ببساطة بالكمية $P\,\Delta V$. وإذا كان النظام ينكمش فإن ΔV سيكون سالبا ، وفى هذه الحالة يبذل النظام شغلا سالبا . وفى الحقيقة فإن الوسط المحيط هو الذى يبذل شغلا على النظام .

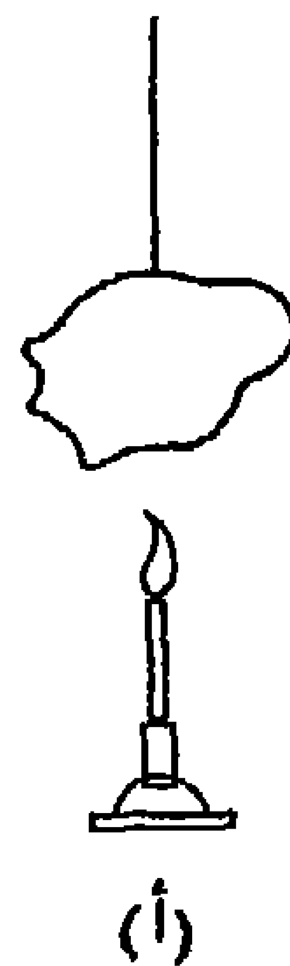
من المهم عادة أن نلاحظ أن شغل التمدد لنظام ما يمكن تمثيله بمساحة فى نوع معين من الأشكال البيانية يسمى الرسم البيانى $P\text{-}V$. وكمثال بسيط جدا لهذا الرسم البيانى ، اعتبر حالة التمدد الحرارى لجسم معدنى صلب ، كما هو مبين فى الشكل ١٢ - ٢ . وعند تسخين هذا الجسم فإنه يتمدد ، ويلاحظ أن هذا يتم أثناء وجود الجسم تحت تأثير الضغط الجوى P_A ، وبالطبع فإن P_A يظل ثابتا أثناء التمدد . ويمكننا تمثيل هذا التمدد كما هو مبين فى الرسم البيانى $P\text{-}V$ الموضح فى الجزء ب من الشكل .

ونرى من هذا الشكل أن الجسم يبدأ فى التمدد عند النقطة « بارد » فى الشكل ، وفى هذه النقطة يكون V_c هو حجم الجسم و P_A هو الضغط المؤثر عليه . وأثناء التمدد يتغير حجم النظام متبعا الخط الأفقى المبين ، مع بقاء الضغط ثابتا . من المعادلة (١٢ - ٢) نجد أن الشغل المبذول بواسطة الجسم أثناء التمدد هو :

$$\Delta W = P\,\Delta V = P_A(V_h - V_c)$$



(ب)



(أ)

شكل (١٢ - ٢) الشغل المبذول بواسطة الجسم عندما يتمدد ضد الضغط الجوى يساوى المساحة الموجودة تحت المنحنى $P\text{-}V$. (أ) يتمدد الجسم عند تسخينه ، (ب) الرسم البيانى $P\text{-}V$ للتجربة الموضحة فى (أ)

ولكن الكمية P_A هى ارتفاع المستطيل المظلل فى الشكل ١٢ — ٢ب ، بينما $V_h - V_c$ هى عرضه . إذن ، $P_A(V_h - V_c)$ بيساطة هى المساحة المظللة .
نستنتج إذن أن :

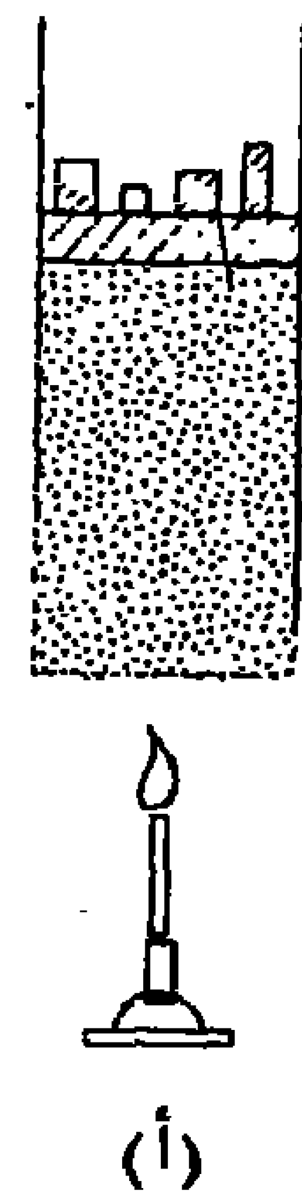
الشغل وعلاقته بالمساحة

شغل التمدد المبذول بواسطة النظام يساوى المساحة الموجودة تحت المنحنى P-V لهذا النظام .

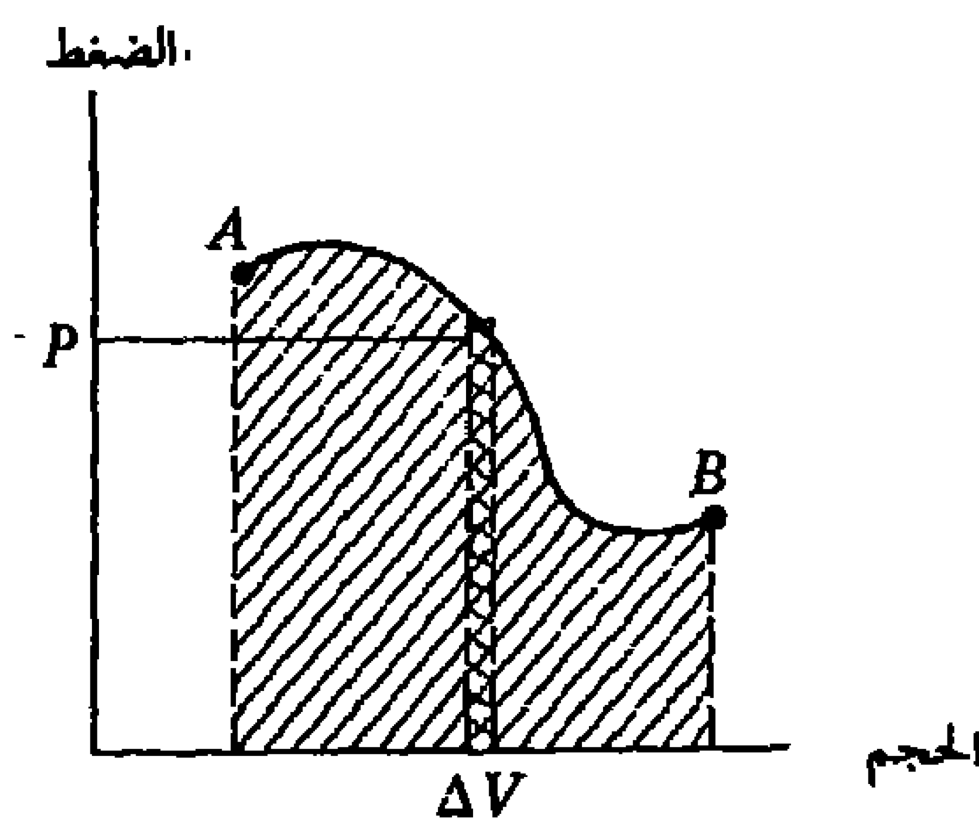
وبالرغم من أن هذه العلاقة قد اشتقت فى حالة بسيطة جدا ، فإنها صحيحة عموما . ولكى نتأكد من ذلك ، لنرجع إلى الشكل ١٢ — ٣ .

يمثل هذا الشكل غازا فى اسطوانة مغلقة بواسطة كباس . ويمكن تغيير الضغط على الكباس بإضافة أو انقاص الأوزان عليه . كذلك يمكن تغيير الضغط والحجم إيضا بتسخين الغاز أو تبريده . لنفرض أن الشروط قد تغيرت بحيث تغير الحجم من V_A إلى V_B متبعا المسار المبين فى الجزء ب من الشكل .

اعتبر المساحة الصغيرة المظللة بشدة والتى تمثل تغير الحجم بمقدار ΔV عند ضغط ثابت ، تقريبا ، مقداره P . الشغل المبذول فى هذا الجزء الصغير من التمدد الكلى يساوى $P \Delta V$. ولكن هذه الكمية تساوى مساحة المستطيل المظلل بشدة . بالمثل ، يمكن اعتبار التمدد الكلى من A إلى B . كما لو كان مكونا من مجموعة من مثل هذه التمددات الصغيرة . والشغل المبذول أثناء كل منها يساوى المساحة الموجودة تحت المنحنى P-V الخاص بها . وعليه فإن الشغل الكلى المبذول يساوى مجموع جميع هذه المساحات الصغيرة ، أى المساحة الموجودة تحت المنحنى من A إلى B نرى من ذلك إذن أن شغل التمدد يساوى دائما المساحة الموجودة تحت المنحنى P-V .



(أ)



(ب)

شكل (١٢ — ٣)
الشغل المبذول بواسطة النظام عند الانتقال من A إلى B يساوى المساحة الموجودة تحت المنحنى .

مثال توضيحى ١٢ - ١ . سخن مكعب من النحاس الأصفر طول كل من اضلاعه 15 cm من $20°C$ إلى $300°C$ ما هى كمية الشغل التى يبذلها المكعب أثناء التمدد ؟

طريقة الحل . يتمدد المكعب ضد الضغط الجوى وهو حوالى $1 \times 10^5 N/m^2$. وطبقا لمعادلة التمدد الحرارى :

$$\Delta V = V\gamma \Delta T$$

وفى هذه الحالة $V = (0.15)^3 m^3$ ، $\Delta T = 280°C$ ، $\gamma = 5.7 \times 10^{-5} °C^{-1}$
بالتعويض فى المعادلة السابقة نجد أن $\Delta V = 5.4 \times 10^{-5} m^3$

والآن نستخدم العلاقة :

$$\Delta W = P\Delta V$$

لنحصل على :

$$\Delta W = 5.4 \text{ J}$$

من المهم أن نلاحظ أن الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة هذه الكمية من النحاس الأصفر بمقدار $280°C$ تساوى 10^6 cal . تقريبا . إذن ، كمية الحرارة المستهلكة فى بذل شغل التمدد تساوى أقل من جزء واحد من المليون من الطاقة الحرارية الكلية .

١٢ - ٤ العمليات المألوفة فى الغازات

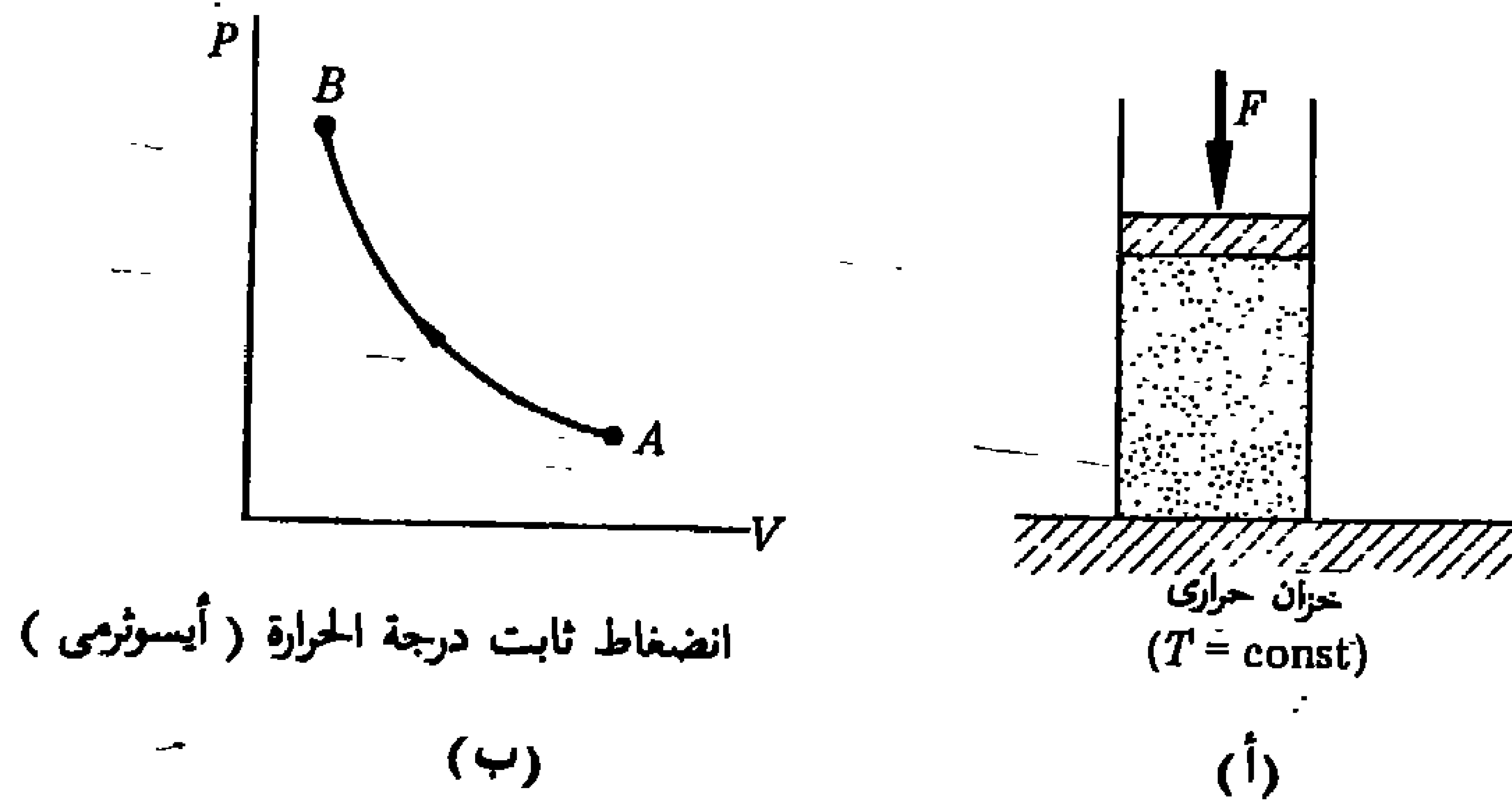
رأينا توا أن المنحنى P-V لنظام يعانى تغيرا فى الحالة يرتبط بالشغل المبذول بواسطة النظام . وعند رسم مثل هذا الرسم البيانى يفترض أن التغير بطىء بدرجة تكفى لاعتبار الضغط ودرجة الحرارة منتظمين فى أى لحظة خلال النظام بأكمله . لنفحص الآن بعض الطرق الهامة لحدوث تغير فى نظام يتكون من كمية من الغاز . **العملية الأيسوثرمية** (أو العملية ثابتة درجة الحرارة) ، هى تلك التى تتم مع ثبوت درجة الحرارة . وحيث أن درجة حرارة الغاز المثالى مقياس لطاقته الداخلية ، فإن العملية الأيسوثرمية هى عملية ثابتة الطاقة الداخلية . وعليه فإن $\Delta U = 0$ أثناء العملية الأيسوثرمية فى حالة الغاز المثالى . وعندئذ يتحول القانون الأول : تعريف العملية الأيسوثرمية

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W$$

إلى الصورة :

غاز مثالى ، ايسوثرمى
$$\Delta Q = -\Delta W$$

شكل (١٢ - ٤)
الرسم البيانى P-V للإنضغاط ثابت درجة الحرارة (أو الأيسوثرمى) :



انضغاط ثابت درجة الحرارة (أيسوثرمى)
(ب) (أ)

لتوضيح معنى هذه العلاقة ارجع إلى الموقف المبين فى الشكل ١٢ - ٤ ، ويمثل هذا الشكل وعاء يحتوى على كمية من الغاز ويتلامس تلامسا حراريا جيدا مع الخزان الحرارى . وقد يكون هذا الخزان الحرارى فرنا أو حمام تبريد أو أى جهاز آخر درجة حرارته ثابتة . وهذا الخزان يحفظ درجة حرارة الوعاء والغاز ثابتة بشرط ألا يتحرك الكباس الذى يغلق الوعاء بسرعة كبيرة .

لنفرض أننا وضعنا أوزانا على الكباس المبين فى الشكل ١٢ - ٤ ببطء . عندئذ سوف يزداد الضغط ويقل الحجم ببطء كذلك . وإذا رسمنا العلاقة بين الضغط والحجم لهذه العملية الأيسوثرمية فإننا سنحصل على الرسم P-V المبين فى الجزء ب من الشكل . ويعطى شكل هذا الرسم البيانى بقانون الغاز المثالى :

$$PV = nRT$$

الذى يتحول فى حالة العملية الأيسوثرمية إلى الصورة :

$$P = \frac{\text{const}}{V}$$

لان T ثابتة . وهذه هى معادلة الخط المستقيم المبين فى الشكل ١٢ - ٤ .

لنفرض الآن أن الغاز قد انضغط من النقطة A إلى النقطة B على الرسم البيانى . والآن إذا أنقصت القوة المؤثرة على الكباس ببطء فإن العلاقة بين P و V ستكون صحيحة . فى هذه الحالة سوف يتبع النظام نفس الخط البيانى عندما يعود من الحالة B إلى الحالة A . وتسمى مثل هذه العملية بالعملية الانعكاسية . لاحظ أن متغيرات الحالة تكتسب أثناء العملية الإنعكاسية نفس القيم فى جميع مراحل العملية بصرف النظر عن الاتجاه الذى تجرى فيه هذه العملية . لاحظ كذلك أن العمليات ليست جميعها انعكاسية . فمثلا ، العملية التى تتضمن فواقد احتكاك كبيرة لايمكن أن تكون انعكاسية . لماذا ؟

العملية الانعكاسية

تعريف **العملية الاديباباتية هى تلك التى لايفقد النظام أو يكتسب خلالها طاقة** حرارية . فمثلا ، إذا كان النظام معزولا عزلا جيدا عن الوسط المحيط ، فإن انتقال الحرارة يكون مهملا عادة . كذلك إذا أجريت العملية بسرعة كبيرة . (كالإنضغاط الفجائى لغاز مثلا) ، فإن كمية الحرارة التى تنتقل من أو إلى النظام خلال تلك الفترة الزمنية القصيرة تكون صغيرة جدا ويمكن إهمالها . وعليه فإن هذه العملية ادياباتية .

العملية الاديباباتية وإذا كانت العملية ادياباتية ، فإن القانون الأول :

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

يصبح :

$$\Delta U = -\Delta W \quad \text{للعملية الأدياباتية}$$

وهذه العلاقة ليست مقصورة على الغاز المثالى . وهى تبين لنا أنه إذا كان النظام يبذل شغلا أدياباتيا فإن الطاقة الداخلية للنظام لابد أن تنقص . هذا لأن الشغل يبذل على حساب الطاقة الداخلية . أما إذا كان الشغل الأدياباتى مبذول على النظام ، فإن الطاقة الداخلية يجب أن تزيد . ويبين المثالان التوضيحيان التاليان استخدامين عمليين لهذه العمليات . ومع ذلك ، فإننا سوف ندرس أولا السلوك الأدياباتى للغاز المثالى ببعض التفصيل .

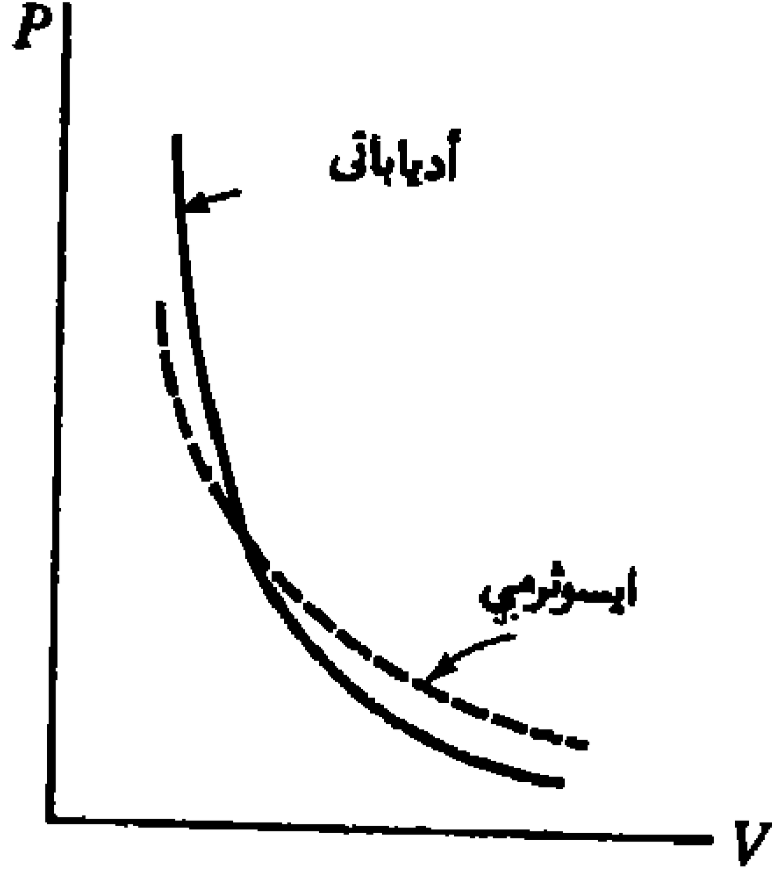
فى حالة الغاز المثالى لاتوصف العملية الأدياباتية بدلالة القانون $PV = nRT$ وحده . وتكمن الصعوبة فى أن متغيرات الحالة الثلاثة (P ، V ، T) تتغير جميعها أثناء العملية ، ولإيجاد كيفية تغير كل منها تلزمنا معادلة أخرى . ويمكن إيجاد هذه المعادلة بملاحظة أن الشغل المبذول على الغاز يتحول تماما إلى طاقة داخلية ، وهذه الزيادة فى الطاقة الداخلية تسبب تغير درجة الحرارة فى النظام . ولكن نفس هذا التغير فى درجة الحرارة يمكن أن يتحقق بإضافة الحرارة إلى النظام . ومن ثم فإن من الممكن إيجاد علاقة بين كمية الحرارة وتغير درجة الحرارة والشغل حتى فى حالة العملية الأدياباتية . ويؤدى هذا الخط فى التفكير فى حالة الغاز المثالى إلى النتيجة التالية :

إذا حدث تغير أدياباتى فى الغاز المثالى من P_1 ، V_1 ، T_1 إلى P_2 ، V_2 ، T_2 فإن

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma} \qquad (١٢ - ٣)$$

حيث $\gamma = c_P/c_V$ للغاز المثالى . وقد اعطيت بعض القيم الفعلية للنسبة c_P/c_V سابقا فى الجدول ١١ — ٢

يعطى الخط البيانى $P\text{-}V$ للتغير الأدياباتى بالمعادلة (١٢ – ٣) ، ويمثل الشكل ١٢ – ٥ إحدى حالات التغير الأدياباتى . وللمقارنة ، وضحنا فى نفس الشكل الخط البيانى $P\text{-}V$ لتغير ايسوثرمى (الخط المنقط) . وكما هو متوقع ، يلاحظ من الشكل أن الخط البيانى الأدياباتى اكثر انحدارا من الخط الايسوثرمى عند القيم المتقاربة من P و V .



شكل (١٢ –٥)
مقارنة بين التغير الأدياباتى والتغير الايسوثرمى لغاز مثالى .

مثال توضيحى ١٢ – ٢ : فى محرك ديزل يشعل الوقود فى أسطوانة المحرك بضغط الغاز فجأة فى الأسطوانة . لنفرض أن حجم الغاز قد انضغط إلى جزء من خمسة عشر من قيمته الأصلية . بفرض أن الضغط الإبتدائى يساوى الضغط الجوى تقريبا ، أى $1\times10^5\ N/m^2$ ، وبفرض أن درجة الحرارة الإبتدائية $27°C$ ، أوجد درجة الحرارة النهائية للغاز . افترض أن الغاز الموجود فى الاسطوانة هو الهواء أو النتروجين .

طريقة الحل . هذه هى عملية أدياباتية أساسا ، لأن الغاز يضغط فى الأسطوانة بسرعة كبيرة . وإذا اعتبرنا أن الغاز هو النتروجين N_2 وأنه يتصرف كغاز مثالى ، فإن الجدول ١١ – ٢ يعطينا القيمة $\gamma = 1.40$. ونحن نعلم أن :

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$$

أو :

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma}$$

ولكننا نهتم بالتغير فى درجة الحرارة وليس الضغط . لهذا يجب تطبيق قانون الغاز المثالى على الحالة الابتدائية للغاز وعلى حالته النهائية . إذن :

$$P_1V_1 = nRT_1$$

و :

$$P_2V_2 = nRT_2$$

بقسمة إحدى المعادلتين السابقتين على الأخرى واجراء التبسيط اللازم نجد أن :

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

بالتعويض من هذه المعادلة فى المعادلة الأساسية نجد أن :

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

وفى حالتنا هذه $V_2/V_1 = \frac{1}{15}$ ، إذن :

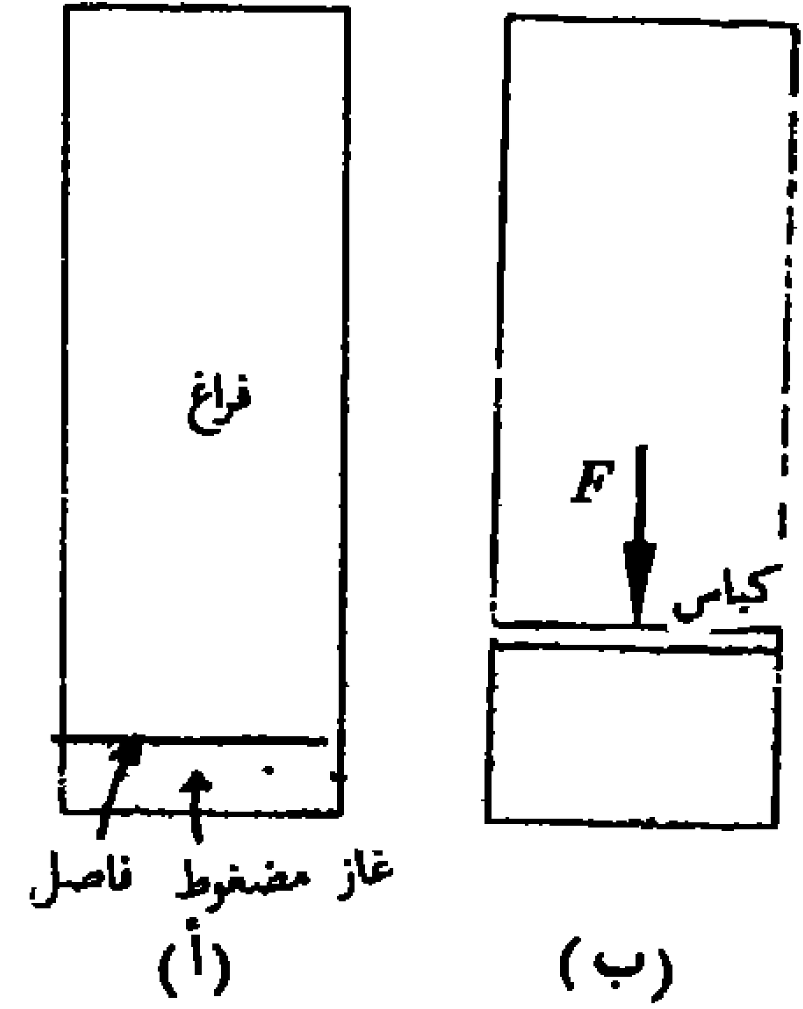
$$T_2 = T_1(\tfrac{1}{15})^{-0.40}$$

وحيث أن درجات الحرارة T فى هذه العلاقات هى درجات الحرارة المطلقة ، فإن $T_1 = 300\ K$. بأخذ لوغاريتم طرفى المعادلة نجد أن :

$$\begin{aligned}\log T_2 &= \log(300) - 0.40(\log 1 - \log 15)\\ &= 2.477 - 0.40(0 - 1.176)\\ &= 2.947\end{aligned}$$

وبأخذ مقابل اللوغاريتم نجد أن $T_2 = 886\ K$ أى 613°C . لاحظ كيف اصبح الغاز ساخنا جدا بسبب الانضغاط الأدياباتى .

شكل (١٢ - ٦)
(أ) ثقبت فتحة صغيرة فى الفاصل لكى يتمدد الغاز ، (ب) يرفع الغاز المتمدد الكباس إلى أعلى . تحت أى الشروط يكون تبريد الغاز أكبر مايمكن ؟



مثال توضيحى ١٢ - ٣ : كما هو واضح فى الشكل ١٢ - ٦ أ ، قسم وعاء مغلق إلى قسمين ، احدهما صغير يحتوى على غاز تحت ضغط عال ، والآخر كبير ومفرغ تماما . ثقبت فتحة صغيرة فى الجدار الموصل بين الجزءين لكى يتمدد الغاز من الغرفة الصغيرة إلى الغرفة المفرغة الكبيرة . صف تغير حرارة الغاز بفرض أن العملية أدياباتية .

عملية تخفيف الضغط بالخنق

تسمى هذه العملية ، التى يتمدد فيها المائع خلال فتحة صغيرة أو قرص مسامى ، **عملية تخفيف الضغط بالخنق** ، وحيث أنها أدياباتية ، يمكننا كتابة القانون الأول على الصورة :

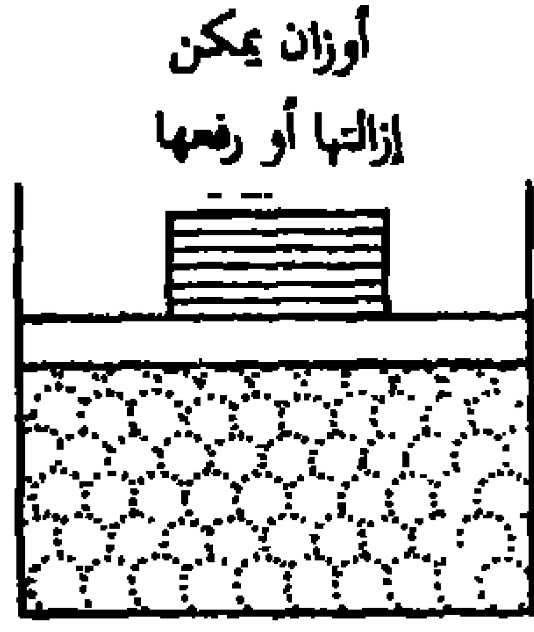
$$\Delta U = -\Delta W$$

حيث ΔW هو الشغل المبذول بواسطة المائع أثناء العملية .

المطلوب منا هو معالجة الغاز كحالة خاصة . لنفرض أولا أن الغاز مثالى . لذلك يمكننا أن نقول أن الغاز المثالى لايبذل شغلا محصلا أثناء عملية التمدد فى الفراغ ، وهى الموضحة فى الشكل ١٢ - ٦ أ . وهذا لأن الضغط الخارجى الذى يقاوم التمدد يساوى صفرا ، وبالتالى $P\,\Delta V = 0$. وحيث أن الغاز لايبذل أى شغل ، فإن المعادلة $\Delta U = -\Delta W$ تبين لنا أن الطاقة الداخلية للغاز لاتتغير . وحيث أن $U \sim T$ فى حالة الغاز المثالى ، فإن T لاتتغير . إذن ، إذا كان الغاز المتمدد غازا مثاليا ، فإن درجة الحرارة تظل ثابتة أثناء التمدد .

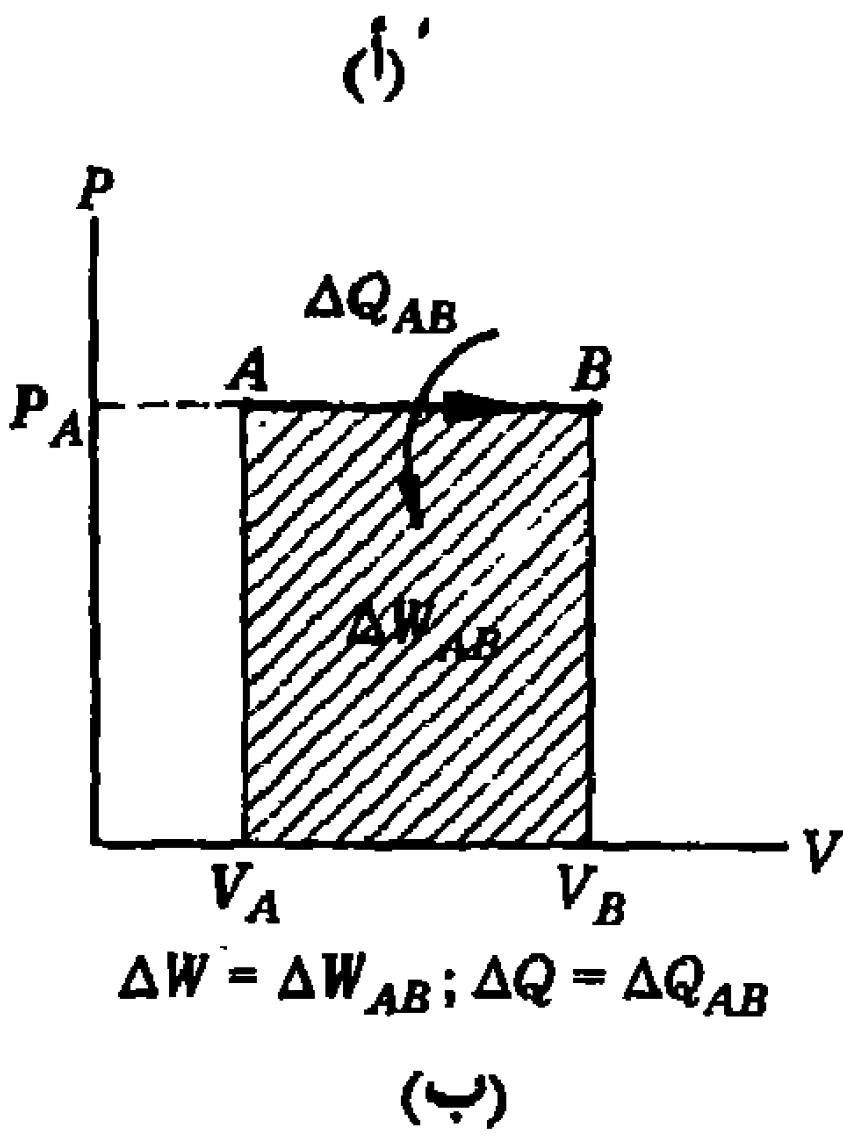
ومع ذلك فإن النتيجة سوف تختلف إذا لم يكن المائع غازا مثاليا . لنفرض أن المادة المضغوطة سائل كالبيوتان الذى يتبخر عند تمدده فى الفراغ . إذن لابد أن تزود الجزيئات بالطاقة لكى يتحول السائل إلى بخار ، وهذه الطاقة هى بالطبع حرارة التبخير . وحيث أن العملية أدياباتية ، فإن الطاقة اللازمة يجب أن تأتى من الطاقة

الداخلية الكامنة من قبل فى المائع . نتيجة لذلك تقل طاقة حركة الجزيئات أثناء عملية التمدد ، وعليه فإن درجة حرارة البخار ستكون أقل من درجة حرارة السائل الأصلى (وهذا يشبه عملية التبريد بالتبخير إلى حد كبير) . ويمكنك أن ترى أن هناك إمكانيات عديدة بين الغاز المثالى ، حيث لايحدث أى تبريد اطلاقا ، وبين السوائل الطيارة ، حيث يحدث قدر كبير من التبريد .



(أ)

ومع ذلك فإن الغاز المثالى ذاته يمكن أن يبرد فى بعض الحالات الخاصة أثناء التمدد الأدياباتى . فمثلا ، لنفرض أننا استعضنا عن الفاصل بكباس قابل للحركة كما هو مبين فى الشكل ١٢ – ٦ ب . عندئذ سيبذل الغاز شغلا أثناء التمدد ضد الكباس . وبالطبع سوف يؤدى هذا الشغل إلى نقص فى الطاقة الداخلية للغاز ، وعليه فإن الغاز سوف يبرد .

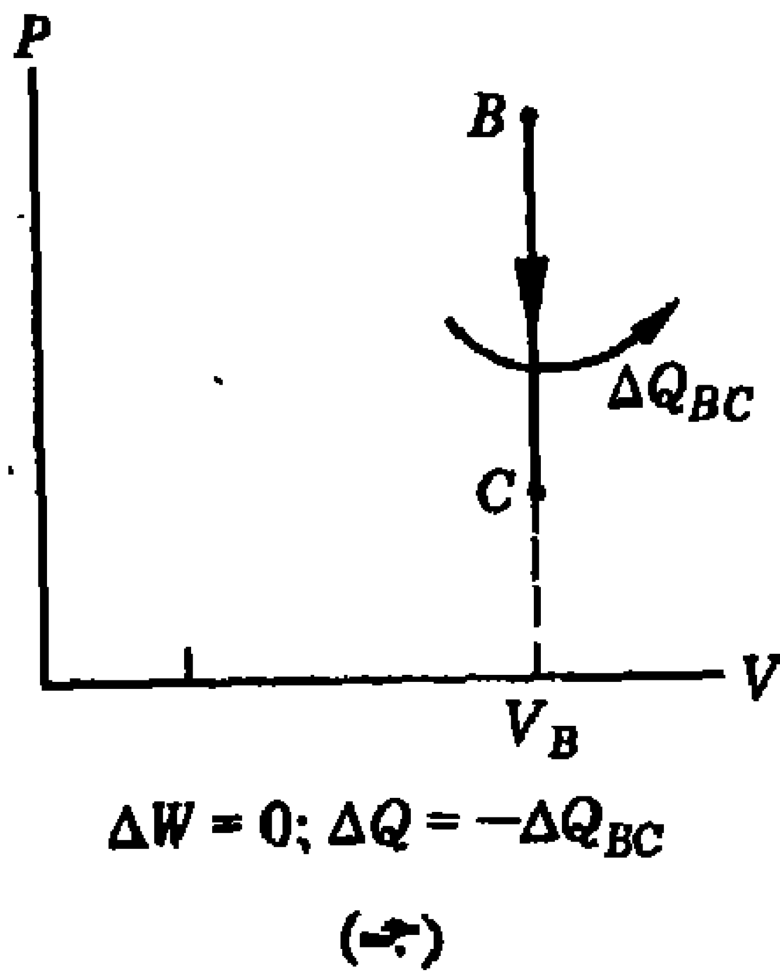


$\Delta W = \Delta W_{AB}$; $\Delta Q = \Delta Q_{AB}$

(ب)

١٢ – ٥ العمليات الدورية وتحول الطاقة

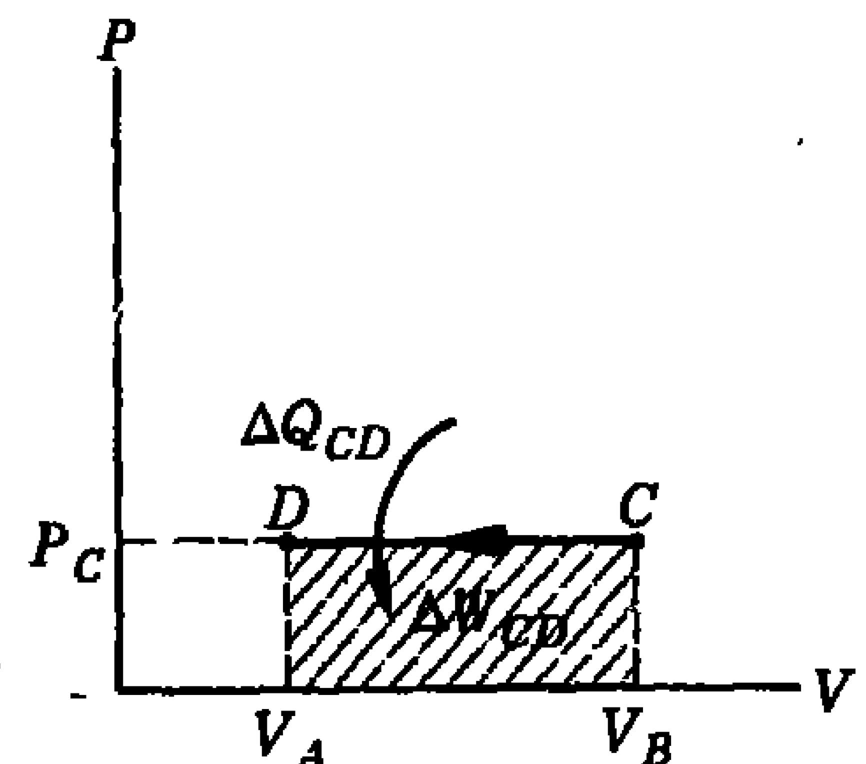
إن تطبيق الديناميكا الحرارية على المحركات والمبردات يعتبر واحد من التطبيقات الأساسية لهذا العلم . وتتشابه جميع هذه الأجهزة فى نقطة هامة ، وهى أنها تقوم بنفس العملية (أو الدورة) مرارا وتكرارا . وكما سوف نرى ، فإن كفاءة مثل هذا الجهاز محدودة بقانون من قوانين الطبيعة يجعل تصميم آلات أو محركات كفاءتها قريبة من 100% صعبا لدرجة كبيرة جدا تصل إلى الإستحالة .



$\Delta W = 0$; $\Delta Q = -\Delta Q_{BC}$

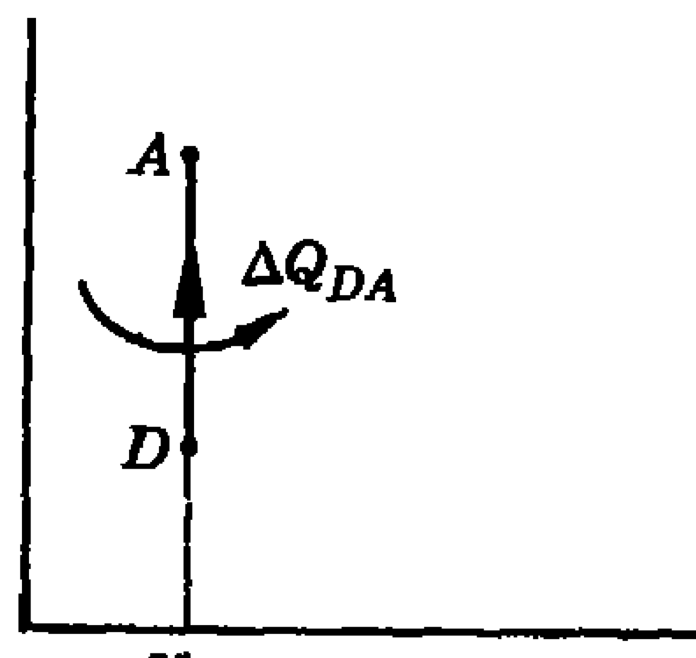
(جـ)

ولكى نبدأ مناقشتنا ، اعتبر النظام المبين فى الشكل ١٢ – ٧ أ . لنفرض أن قيمتى P ، V للنظام تعطيان بالنقطة A فى الرسم البيانى P-V المبين فى الجزء ب من الشكل . لنبدأ الآن فى تسخين الغاز ببطء . عندئذ سوف يزداد الحجم من A إلى B ويظل الضغط ثابتا أثناء هذه العملية لأن الأوزان الموجودة على الكباس لاتتغير . علاوة على ذلك فإن كمية من الحرارة ΔQ_{AB} تضاف إلى النظام كما هو مبين . وحيث أن الغاز يتمدد . فإنه يبذل أيضا كمية من الشغل ΔW_{AB} تساوى المساحة المظللة .



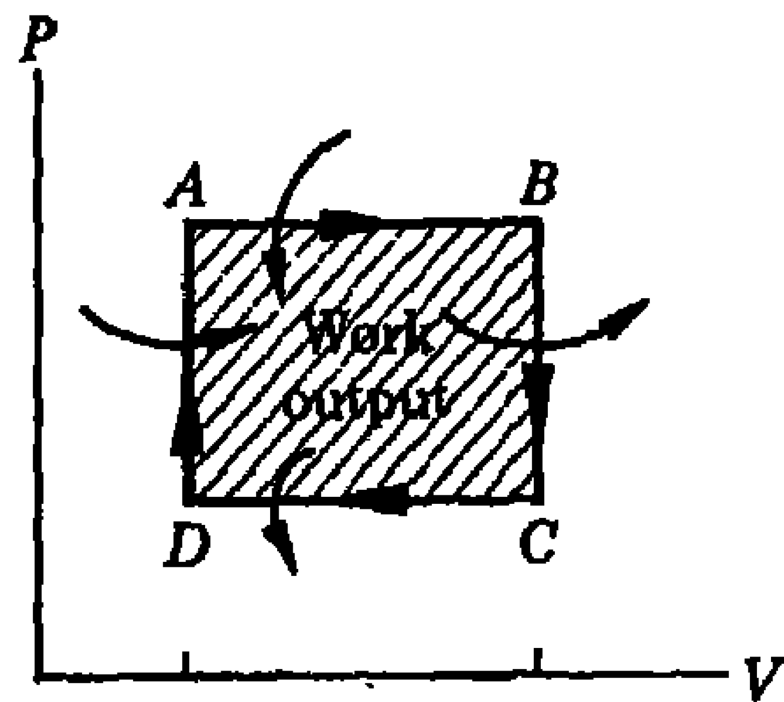
$\Delta W = -\Delta W_{CD}$; $\Delta Q = -\Delta Q_{CD}$

(د)



$\Delta W = 0$; $\Delta Q = \Delta Q_{DA}$

(هـ)



(و)

شكل (١٢ – ٧)
دورة ديناميه حرارية بسيطة الشغل المحصل المبذول يساوى المساحة المحصورة داخل الدورة .

لنبرد بعد ذلك النظام ببطء مع رفع الأوزان فى نفس الوقت بحيث يظل الحجم ثابتا ، وهذا هو الجزء BC من الدورة المبين فى الشكل ١٢ – ٧ جـ وحيث أن الكباس لم يتحرك ، فإن الشغل المبذول فى هذا الجزء من الدورة يساوى صفرا . (لاحظ أن المساحة الموجودة تحت هذا الخط البيانى تساوى صفرا كذلك) . ولكن الحرارة تنتزع من النظام فى هذه الحالة ، إذن $\Delta Q = -\Delta Q_{BC}$ كما هو مبين .

الخطوة التالية من الدورة مبينة فى الجزء د . الآن يبرد الغاز تحت ضغط ثابت ، ولذلك فإن الغاز ينكمش ، وعليه فإن ΔV سالب . ولهذا السبب يبذل النظام شغلا سالبا يساوى $-\Delta W_{CD}$ ، وهو يساوى المساحة المظللة المبينة فى الجزء د . وحيث أن النظام يفقد حرارة فى هذه الخطوة ، فإن $\Delta Q = -\Delta Q_{CD}$

وفى النهاية تستكمل الدورة بالخطوة المبينة فى الجزء هـ . هنا يسخن الغاز مع حفظ الحجم ثابتا بوضع الأثقال على الكباس ، وعندئذ يزداد الضغط من D إلى A ولايبذل النظام أى شغل فى هذه العملية . ولكن الحرارة تضاف إلى النظام ، وعليه فإن $\Delta Q = \Delta Q_{DA}$.

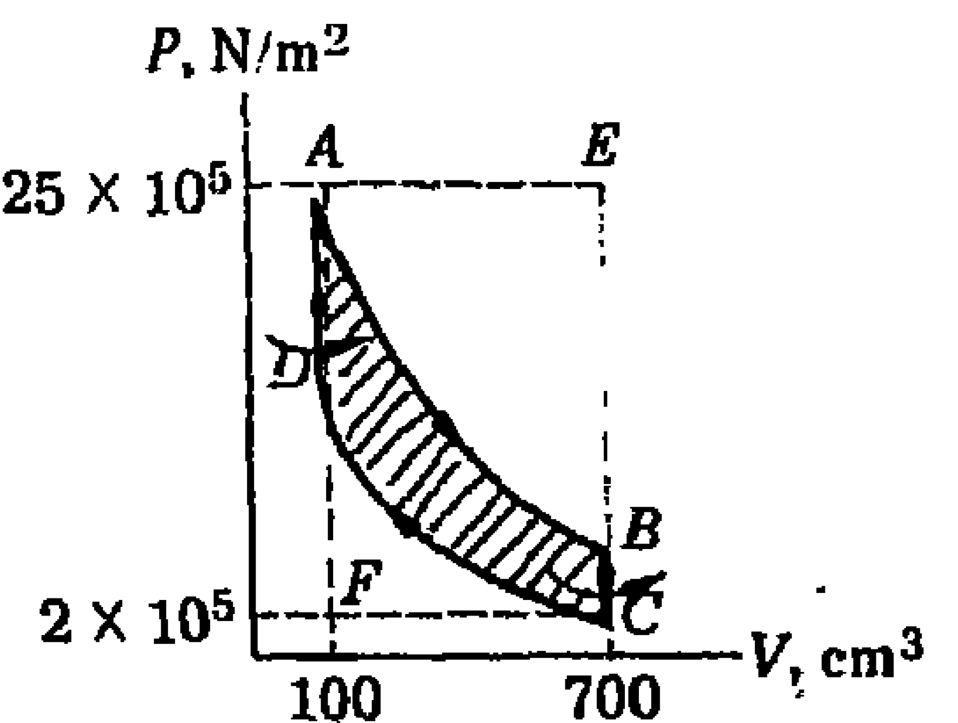
الدورة الكاملة موضحة فى الشكل ١٢ – ٧ و . لاحظ أن صافى الشغل المبذول بواسطة النظام هو ببساطة المساحة $\Delta W_{AB} - \Delta W_{CD}$ ، وهذه هى المساحة المظللة فى الجزء و من الشكل . وفى هذه الحالة ، كما فى جميع الحالات الأخرى :

الشغل / دورة هو المساحة المحصورة داخل الدورة

صافى شغل الخرج المبذول أثناء الدورة الدينامية الحرارية هو المساحة المحصورة داخل الدورة فى الرسم البيانى P-V الذى يمثلها .

وهذه نتيجة هامة لأنها تسمح لنا بإيجاد شغل الخرج لمحرك أو آلة من الرسم البيانى مباشرة .

شكل (١٢ – ٨)
دورة أوتو ، وهى الدورة المثالية لمحرك الاحتراق الداخلى .



مثال توضيحى ١٢ – ٤ : يمثل الشكل ١٢ – ٨ الرسم البيانى P-V المثالى لأحد اسطوانات محرك جازولين عادى . (هذه الدورة المثالية تسمى **دورة أوتو**) . تضغط الاسطوانة المليئة بالهواء من النقطة C أدياباتيا إلى النقطة D . ويشعل بخار الجازولين أثناء الجزء DA من الدورة . ولذلك فإن الحرارة تضاف بسرعة إلى الغاز دون تغير يذكر فى الحجم . وبعد ذلك يتحرك الكباس إلى الخارج أثناء تمدد الغاز الساخن أدياباتيا فى الجزء AB . ثم تطلق الحرارة إلى ماسورة العادم خلال الجزء BC ، وتتكرر العملية الأصلية بعد ذلك . بفرض أن المساحة المظللة ثلث المساحة الكلية $AECFA$ ، أوجد صافى شغل الخرج للأسطوانة لكل دورة .

طريقة الحل : صافى شغل الخرج يساوى المساحة المحصورة داخل الدورة . لنوجد أولا مساحة المستطيل $AECFA$.

$$1380\ \text{J} = (23 \times 10^5\ \text{N/m}^2)(600 \times 10^{-6}\ \text{m}^3) = AECFA \text{ المساحة}$$

ولكن المساحة المظللة ، وهى تساوى صافى شغل الخرج . هى ثلث هذه المساحة . إذن صافى شغل الخرج لكل دورة هو 460 J .

١٢ - ٦ كفاءة المحرك (أو الآلة)

مع تفاقم مشكلة الطاقة التى يعانيها العالم حاليا ، يزداد قلق الإنسان على مصادر الطاقة المتاحة على الأرض . لذلك فانه يبحث عن طرق تمكنه من تقليل استهلاك الطاقة . وربما كان تحسين كفاءة المحركات المستخدمة فى سياراتنا وفى المركبات الأخرى إحدى الطرق الواضحة لتحقيق هذا الهدف . ولكن ، لسوء الحظ ، مطلبنا فيما يتعلق بكفاءة المحرك مقيد بشدة . ذلك لأن القانون الأول للديناميكا الحرارية يضع حدا للكفاءة الممكن تحقيقها . لنرى الآن ماهو هذا الحد .

تعرف كفاءة المحرك بنفس الطريقة المستخدمة لتعريف كفاءة أى مكنة . إذن ، تعرف كفاءة المحرك بالمعادلة التالية :

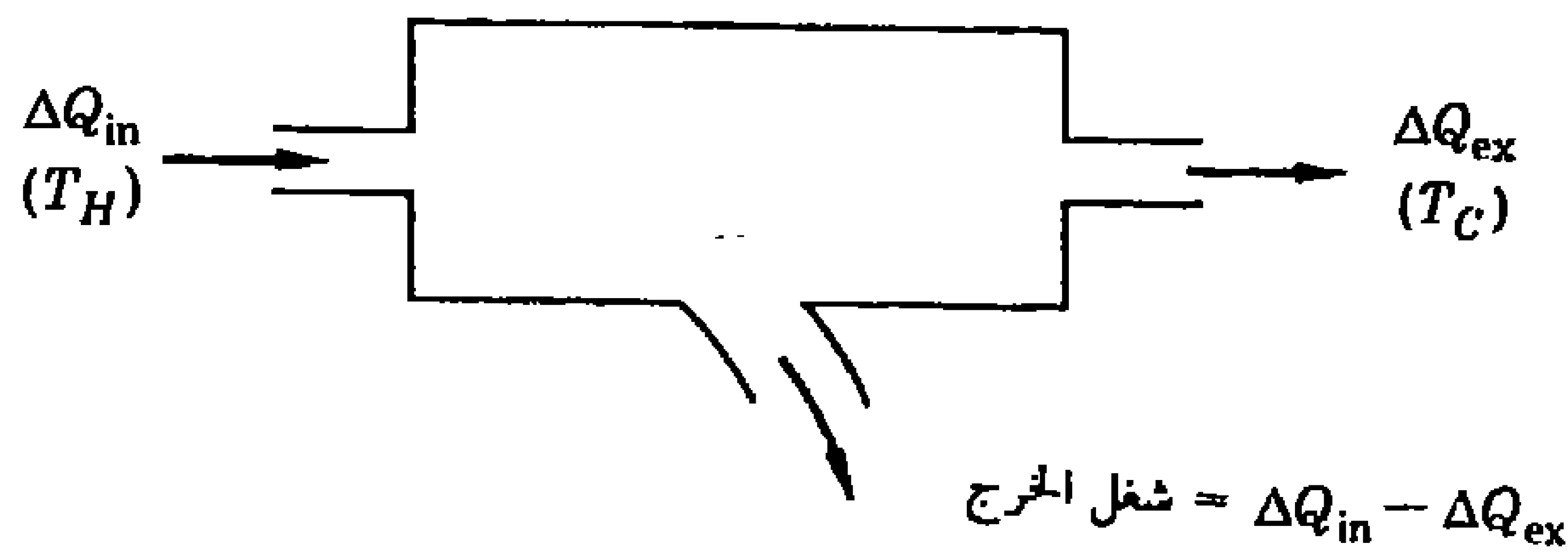
$$\text{الكفاءة} = \frac{\text{صافى شغل الخرج /دورة}}{\text{طاقة الدخل /دورة}}$$

ويعطى صافى شغل الخرج بالمساحة المحصورة داخل الدورة P-V للمحرك . ولكننا لن نستخدم هذه القيمة فى حسابنا . وبدلا من ذلك سنقوم بحساب الكفاءة باستخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية مباشرة .

اعتبر أى محرك يستخدم الوقود المحترق فى تشغيله . (المحرك الكهربى هو فى الواقع جزء من « المحرك » الأكبر الذى يحتوى على مولدات وحدة توليد القوى) . فالجازولين المحترق فى محرك الإحتراق الداخلى ، مثلا ، يزود النظام بالطاقة الحرارية ، وهذه هى طاقة دخل المحرك ، وسوف نفرض أن ΔQ_{in} هى طاقة الدخل لكل دورة من المحرك .

ويفقد دائما جزء من حرارة الدخل هذه من المحرك بطريقة غير منتجة . فمثلا ، تحمل الغازات الساخنة المنطلقة من ماسورة عادم السيارة جزءا من الطاقة لايستفاد به علاوة على ذلك فإن فواقد الطاقة الاحتكاكية قد تكون هامة كذلك . وسوف نرمز للطاقة الكلية المفقودة نتيجة لهذه العمليات بالرمز ΔQ_{ex} .

شكل (١٢ - ٩)
شغل الخرج للمحرك أصغر دائما من طاقة الدخل بمقدار يساوى حرارة العادم .



والآن سنقوم بتطبيق القانون الأول ، وهو فى الحقيقة قانون بقاء الطاقة . فى هذه الحالة صافى شغل الخرج المبذول بواسطة المحرك هو الفرق بين طاقة الدخل وطاقة العادم . (ويمثل هذا الشغل تخطيطيا عادة كما هو مبين فى الشكل (١٢ - ٩) . إذن :

$$\Delta Q_{in} - \Delta Q_{ex} \quad = \quad \text{صافى شغل الخرج / دورة}$$

ولكن طاقة الدخل لكل دورة هى ببساطة ΔQ_{in} . ومن تعريف الكفاءة نجد أن :

$$\text{eff} = \frac{\Delta Q_{in} - \Delta Q_{ex}}{\Delta Q_{in}}$$

أو

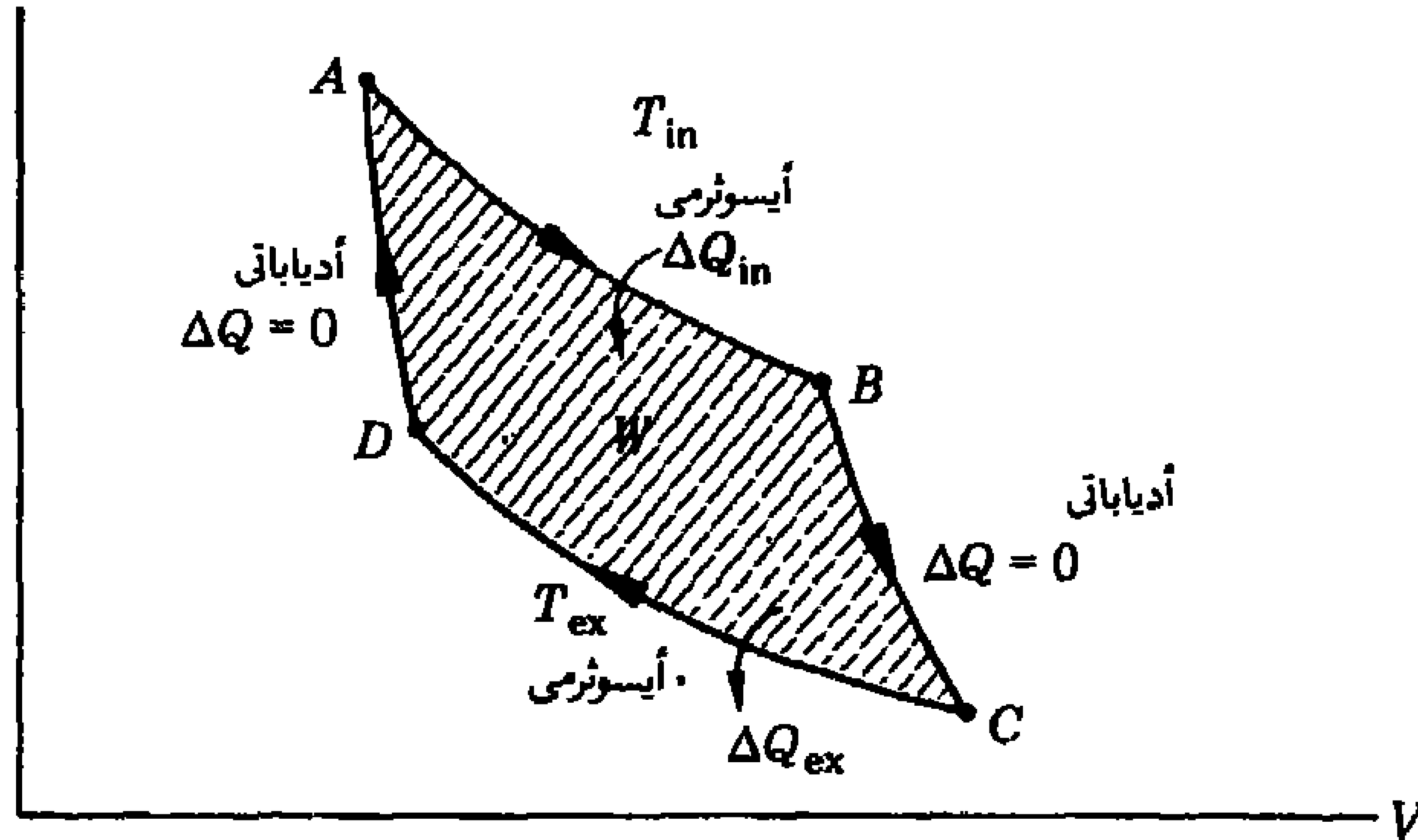
$$\text{eff} = 1 - \frac{\Delta Q_{ex}}{\Delta Q_{in}} \qquad (١٢ - ٤)$$

لاحظ أن المعادلة (١٢ - ٤) تبين لنا أن الكفاءة أقل دائما من الوحدة (أو 100%) بمقدار $\Delta Q_{ex}/\Delta Q_{in}$. وقد نظن أن كل مايجب عمله هو أن نصمم المحرك بحيث تكون الحرارة المفقودة فى عمليات تصريف العادم صغيرة جدا ، ولكن هذا ليس بسيطا كما يبدو . وتكمن الصعوبة فى أن الطاقة الحرارية يمكنها أن تبذل الشغل عندما تنتقل الحرارة من جسم ساخن إلى آخر بارد فقط . أى أن الشغل يبذل إذا كان سريان الحرارة موجودا فقط .

بناء على ماتقدم ، يمكنك أن تخمن أن الشغل الذى تستطيع أن تبذله كمية معينة من الحرارة يعتمد على فرق درجتى الحرارة التى تنتقل الحرارة بينهما . إذن ، كلما كان الفرق بين درجتى حرارة مدخل المحرك ومخرج تصريفه كبيرا ، كلما كانت كفاءة المحرك عالية ، وهذا صحيح بشكل عام . ولكن ثبت فى النهاية أن فرق درجتى الحرارة المهم فى هذه العملية هو الفرق بين درجتى حرارة أكثر الأجزاء ارتفاعا وأكثر الأجزاء انخفاضا فى درجة الحرارة فى دورة المحرك .

ولكن الدورة P-V لمعظم المحركات الحقيقية معقدة إلى حد كبير ، نتيجة لذلك تعتمد كفاءة المحرك بدرجة كبيرة على كيفية تصميم المحرك ذاته . ومع ذلك فقد أثبت

سادى كارنو فى عام ١٨٢٤ نظريا أن هناك محرك (دورة) معين يحقق أعلى كفاءة ممكنة . وهذه الدورة ، تسمى **دورة كارنو** ، مبينة فى الشكل ١٢ – ١٠ .



شكل (١٢ – ١٠)
دورة كارنو

أثبت كارنو أن النسبة $\Delta Q_{ex}/\Delta Q_{in}$ فى المعادلة (١٢ – ٤) تساوى النسبة بين درجتى الحرارة المقابلتين T_{ex}/T_{in} إذن ، تعطى كفاءة دورة كارنو بالعلاقة :

$$\text{eff} = 1 - \frac{T_{ex}}{T_{in}}$$ (١٢ – ٥) **دورة كارنو**

الكفاءة القصوى

بالاضافة إلى ذلك . أثبت كارنو أن المعادلة (١٢ – ٥) هى أعلى كفاءة ممكنة لأى محرك يعمل بين درجتى الحرارة T_{ex} و T_{in} . وعادة لاتكون درجة حرارة العادم أقل من درجة حرارة الجو ، أى حوالى 300 K . إذن ، لكى نحقق أعلى كفاءة ، يجب أن تكون درجة حرارة المائع المستخدم فى المحرك عالية جدا أثناء أكثر الأجزاء سخونة فى الدورة . وتحدد هذه الدرجة أساسا بالمادة المستعملة لبناء المحرك . ومع ذلك ، هناك عوامل محددة أخرى تجعل هذا العامل أقل أهمية . ويمثل الجدول ١٢ – ١ الكفاءات النموذجية للمحركات الحديثة . لاحظ أن القيم المدرجة بالجدول هى القيم القصوى وأنها تقريبية فقط .

مثال توضيحى ١٢ – ٥ : قدر أعلى كفاءة ممكنة للمحرك البخارى .

جدول (١٢ – ١)
كفاءات المحرك النمطية القصوى

المحرك	الكفاءة التقريبية ، ٪
محرك بخارى	15
توربين بخارى	35
محرك جازولينى.	30
محرك ديزل	40

طريقة الحل . الغاز الساخن المستخدم فى المحرك البخارى لتشغيل الكباس هو بخار الماء . وحيث أن الماء يغلى فى درجة 373 K ، فإن ضغط البخار يرتفع بسرعة عند درجات الحرارة العالية . نتيجة لذلك تحدد درجة الحرارة العليا فى الدورة بقوة غلاية البخار . لنفرض أن درجة حرارة البخار الداخل T_{in} =453 K (أى 180°C) . وأيضا ، لايمكن أن تقل درجة حرارة العادم بسهولة عن درجة الحرارة المحيطة . لنفرض إذن أن هذه الدرجة هى T_{ex} =300 K (أى 27°C) إذن :

$$\text{eff} = 1 - \frac{T_{ex}}{T_{in}} = 1 - \frac{300}{453} = 0.34 \text{ or } 34\%$$

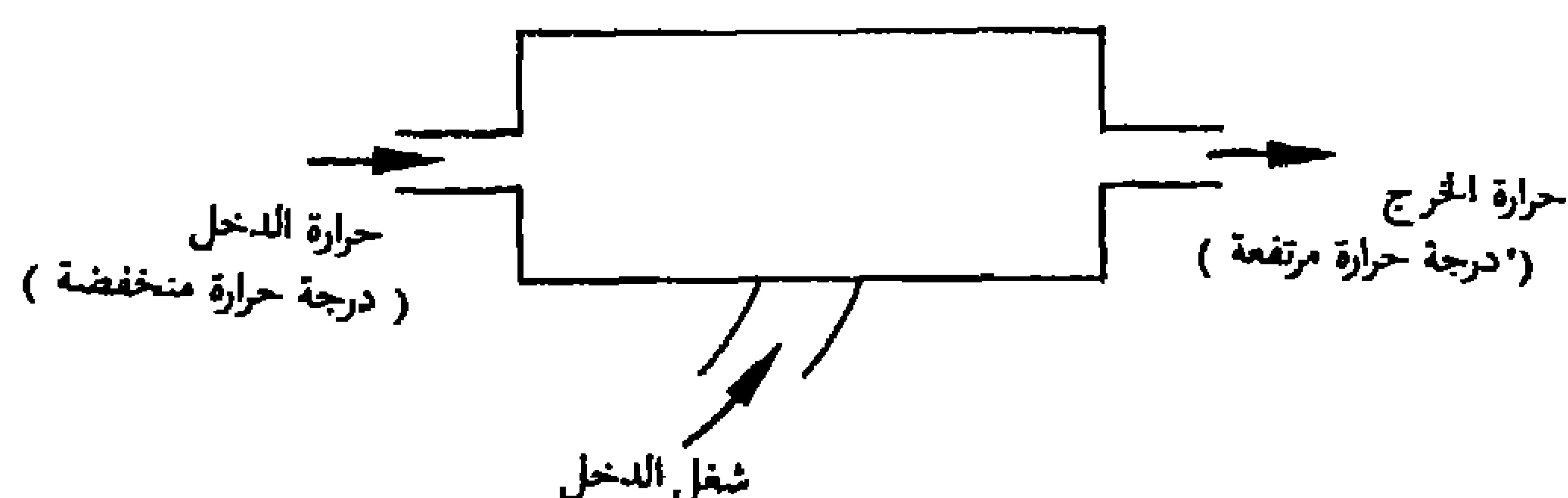
وعمليا قد تكون كفاءة المحرك البخارى ثلث هذه القيمة فقط . لاحظ أن حسابنا مبنى على أساس دورة كارنو ، وبالطبع فإن الدورة الحقيقة ستكون أقل كفاءة .

١٢ - ٧ المضخات الحرارية والمبردات

تستخدم المحركات الطاقة الحرارية لبذل الشغل . أما المبردات والمضخات الحرارية فإنها تقوم بالعملية العكسية تماما ، أى أنها تستخدم الشغل لنقل الحرارة من منطقة باردة إلى أخرى دافئة . ويمثل الشكل ١٢ - ١١ رسما تخطيطيا يوضح مسار الطاقة فى مبرد ذى ضاغط . لاحظ أن الشغل يستخدم فى نقل الطاقة الحرارية من منطقة باردة (داخل المبرد) إلى منطقة دافئة خارج المبرد . وفى هذه الحالة تسير الحرارة فى عكس اتجاه سريانها الطبيعى . لذلك يلزم امداد النظام بالشغل من الخارج ليستمر سريان الحرارة فى الاتجاه المبين . ونحن نعلم من القانون الأول أن :

خرج الحرارة = دخل الحرارة + دخل الشغل

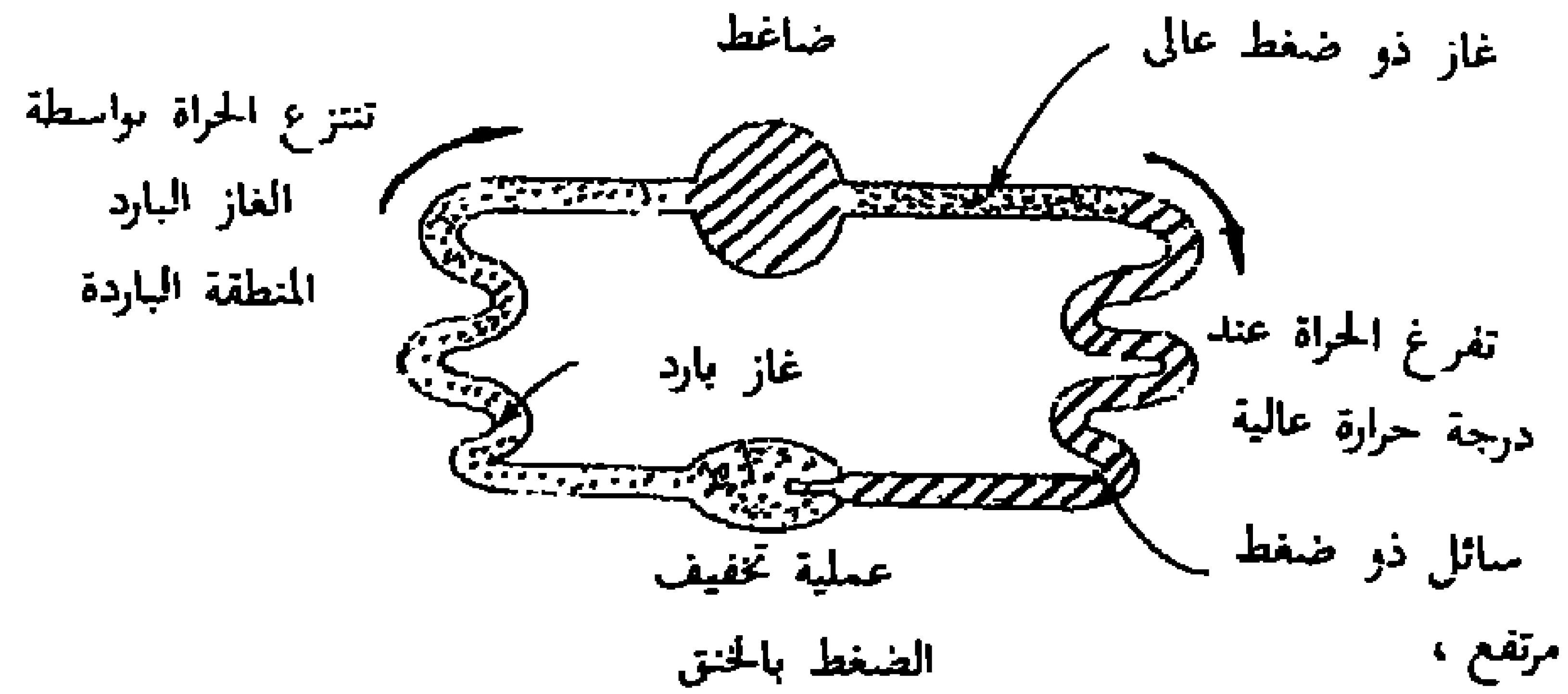
يعمل كثير من أجهزة التبريد بواسطة ضاغط يؤثر على مائع ، ويستخدم غاز الفريون* كثيرا كمائع . وهذا لأنه من الممكن إسالته فى درجة حرارة الغرفة باستخدم



شكل (١٢ - ١١)
مضخة حرارية أو مبرد

* الفريون هو الاسم التجارى لثانى كلوروفلورو الميثان والمركبات المشابهة .

ضغط معتدل .لنرجع إلى الشكل ١٢ – ١٢ لكى نفهم العمليات التى تتم فى المضخات الحرارية أو المبردات .



شكل (١٢ – ١٢)
بعض تفاصيل المضخة الحرارية أو المبرد المحتوية على ضاغط .

يستخدم الضاغط المبين فى أعلى الشكل لضغط غاز الفريون . وحيث أن الضاغط يبذل شغلا على الفريون فإن غاز الفريون يسخن عند انضغاطه . يبرد هذا الغاز الساخن المضغوط ضغطا شديدا بعد ذلك بامراره فى مجموعة أنابيب متصلة مسلطة عليها مروحة أو يدور حولها الهواء (عندما يكون المبرد أو مكيف الهواء دائرا يمكنك أن تشعر باندفاع الهواء الساخن من الجزء غير المبرد فيه . هذا الهواء ينقل الحرارة من مجموعة الأنابيب المتصلة الموجودة فى أيمن الشكل) . وعندما يبرد الفريون قليلا تحت هذا الضغط العالى فإنه يتكثف ويتحول إلى سائل ، ثم يدخل هذا السائل فى نظام نفثى يعمل كصمام خانق .

لعلك تذكر أن عملية تخفيف الضغط بالخنق تتم بواسطة تمدد المائع تمددا فجائيا فى منطقة الضغط . نتيجة لذلك يبرد الفريون فى هذه الحالة بدرجة كبيرة عند خروجه من المنفث كغاز ذى ضغط منخفض . يمرر هذا الغاز البارد بعد ذلك فى مجموعة الأنابيب المتصلة الموجودة فى صندوق تبريد المبرد . أو ، فى حالة وحدة تبريد الهواء ، يدفع الهواء من خارج المبنى إلى داخل الغرفة مارا بهذه الأنابيب . نتيجة لذلك يسخن الغاز البارد قليلا أثناء تبريده للمنطقة القريبة من مجموعة أنابيب التبريد . بعدئذ يعود هذا الغاز إلى الضاغط مرة ثانية حيث تتكرر العملية بأكملها .

تقدر وحدات التبريد عادة بالطن ، وهذه الوحدة لقياس التبريد وحدة عملية بحتة . وتعرف وحدة التبريد 1 ton بأنها كمية « التبريد » التى تستطيع تحويل 1 ton من الماء فى درجة 0°C إلى ثلج عند نفس درجة الحرارة فى زمن تشغيل قدره 1 day . أو ، باستخدام الوحدات الاساسية للحرارة :

$$1 \text{ ton of refrigeration} = 12{,}000 \text{ Btu/h} = 3513 \text{ J/s} = 840 \text{ cal/s}$$

من هذا نرى أن وحدة التبريد 1 ton يجب أن تكون قادرة على تجميد حوالى 10 g من الماء فى الثانية . وعمليا ، يؤدى انتقال الحرارة خلال الماء إلى نقص هذا المعدل بدرجة كبيرة .

يمكن استخدام المضخات الحرارية فى تدفئة المبانى . فحيث أن المضخة الحرارية تقوم بضخ الحرارة من منطقة باردة إلى منطقة دافئة ، يمكنها بالتالى أن تضخ الحرارة من الهواء الطلق البارد إلى داخل المنزل . وفى الحقيقة فإن كثيرا من أنظمة التبريد المنزلية من النوع ذى التأثير العكسى . ففى الشتاء تعكس وحدة التبريد بحيث تقوم بتدفئة المنزل بدلا من تبريده . ويسخن الهواء المندفع إلى داخل المنزل بانتزاع الحرارة من الخارج ومع ذلك . يجدر بنا أن نشير إلى أن استخدام الأفران والتسخين الكهربائى قد أصبح الآن أفضل من الناحية الاقتصادية وخاصة فى المناطق التى تستمر فيها درجة حرارة الهواء الخارجى منخفضة لفترات طويلة .

رأينا مما سبق أن المضخات الحرارية تقوم بنقل الحرارة فى اتجاه معاكس للإتجاه العادى لانتقال الحرارة ولكى يتحقق ذلك لابد من استخدام مصدر طاقة خارجى لبذل الشغل . ذلك أن الميل الطبيعى فى الكون هو أن تنتقل الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد، وقد أوضحنا سبب ذلك سابقا على أساس التركيب الجزيئى للمادة . وتعتبر حقيقة أن هناك اتجاها مفضلا للانتقال الطبيعى للطاقة مبدءا أساسيا فى هذا الكون الذى نعيش فيه . وهذه الظاهرة ملخصة فى القانون الثانى للديناميكا الحرارية . وسوف ندرس هذا القانون ونتائجه فى الأجزاء التالية .

١٢ – ٨ القانون الثانى للديناميكا الحرارية

علق بعضهم ذات مرة على الكون فقال إن « الأحوال تسير من حسن إلى سيء إلى أسوأ » ، وهذا يلخص القانون الثانى للديناميكا بشكل فج جدا . وكما رأينا فإن القانون الأول هو صيغة لبقاء الطاقة ، ولكنه لايذكر أى شيء عن طريقة سير الحوادث فى الكون . فالطاقة محفوظة عندما يسقط حجر على الأرض ، إذ تتحول طاقة وضعه التثاقلية إلى طاقة حركة . وعندما يصطدم الحجر بالأرض ويصل إلى السكون تتحول طاقة حركته إلى طاقة حرارية . ومع ذلك فإن حجرا مستقرا على الأرض لايستطيع أبدا أن يقوم بتحويل الطاقة الحرارية الموجودة فيه وبجانبه إلى طاقة حركة ليطلق إلى أعلى فى الهواء . وبالرغم من أن القانون الأول يحكم مثل هذه الإمكانية أيضا ، لأن الطاقة محفوظة فى هذه العملية العكسية ، إلا أن هذه العملية العكسية لاتحدث تلقائيا .

هناك عمليات كثيرة أخرى لايحكمها القانون الأول . ولكنها لاتحدث . فالماء يتبخر من الطبق ، ولكن البخار الموجود فى الهواء لايتكثف تلقائيا فى الطبق . كذلك تحلل الجثة وتتحول إلى تراب ، ولكن عناصر الأرض لاتقوم بتكوين الجسم تلقائيا فى العملية العكسية . إذن ، للطبيعة اتجاه مفضل لسير الأحداث التلقائية . ويحدد هذا الاتجاه بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية .

منذ أن تبلورت الديناميكا الحرارية كعلم متكامل وحتى الآن وضعت عدة صيغ متكافئة تماما للقانون الثانى . وتلخص إحدى الصيغ الأولى للقانون الثانى حقيقة أن الحرارة تنتقل تلقائيا من الجسم الساخن إلى البارد :

القانون الثانى للديناميكا الحرارية

تنتقل الحرارة تلقائيا من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأقل سخونة وليس العكس . ولهذا يستحيل على النظام الدورى أن ينقل الحرارة من جسم درجة حرارته منخفضة إلى جسم درجة حرارته مرتفعة بشكل غير محدود ما لم يبذل شغل خارجى على النظام .

وتتفق هذه الصيغة مع ماتعلمناه من المحركات والمبردات . فلكى يعمل المبرد يجب استخدام مصدر خارجى للطاقة . ذلك أنه إذا أريد نقل الحرارة من منطقة باردة إلى أخرى أكثر دفئا يلزم بذل شغل خارجى لتحقيق ذلك . وفى حالة المحرك يجب أن يوجد فرق فى درجة الحرارة . فحيث أن كفاءة المحرك تعطى بالكمية $1 - T_{ex}/T_{in}$، فإن الكفاءة تصبح صفرا إذا كانت درجتا الحرارة متساويتين .

وكما نرى ، يخبرنا القانون الثانى أن من المستحيل الاستفادة من الطاقة الحرارية إلا إذا انتقلت إلى منطقة درجة حرارتها منخفضة .

فمثلا ، تحتوى مياه المحيطات على كمية هائلة من الطاقة الحرارية . ولكننا لانستطيع استخدام هذه الطاقة إلا إذا وجد مكان أبرد تستطيع الحرارة أن تنتقل اليه . نتيجة لذلك ، يمكننا أن نقول أن الطاقة الحرارية عديمة الفائدة لنا فيما يتعلق بجميع الأغراض العادية . وسوف نستكشف السبب الأساسى لانعدام فائدة الحرارة الكامنة فى مياه المحيطات فى الجزء التالى .

١٢ – ٩ النظام مقابل عدم النظام (الفوضى)

يعلم كل مقامر أن ترجيح حدث معين يكون أفضل إذا كان الحدث يتحقق بطرق مختلفة كثيرة . ولتوضيح ذلك ، اعتبر لعبة تلقى فيها خمس قطع متماثلة من العملة على منضدة بعد أن تهز جيدا . هناك ستة أحداث فقط يمكن أن تتحقق نتيجة لإلقاء هذه القطع ، وهى كالتالى :

الحدث	عدد مرات ظهور الصورة على الوجه العلوى	عدد مرات ظهور الكتابة على الوجه العلوى
1	0	5
2	1	4
3	2	3
4	3	2
5	4	1
6	5	0

وكتخمين أولى ، قد يبدو أن احتمال وقوع كل من هذه الاحداث متساو . ولكن هذا ليس صحيحا . والسبب هو أن هناك طريقة واحدة لحدوث الحدث 1 أو الحدث 6 . ففى حالة الحدث 1 يجب أن تظهر الكتابة على الوجه العلوى لجميع قطع العملة بلا استثناء . كذلك فى حالة الحدث 6 يجب أن تظهر الصورة على الوجه العلوى لجميع قطع العملات بلا استثناء أيضا .

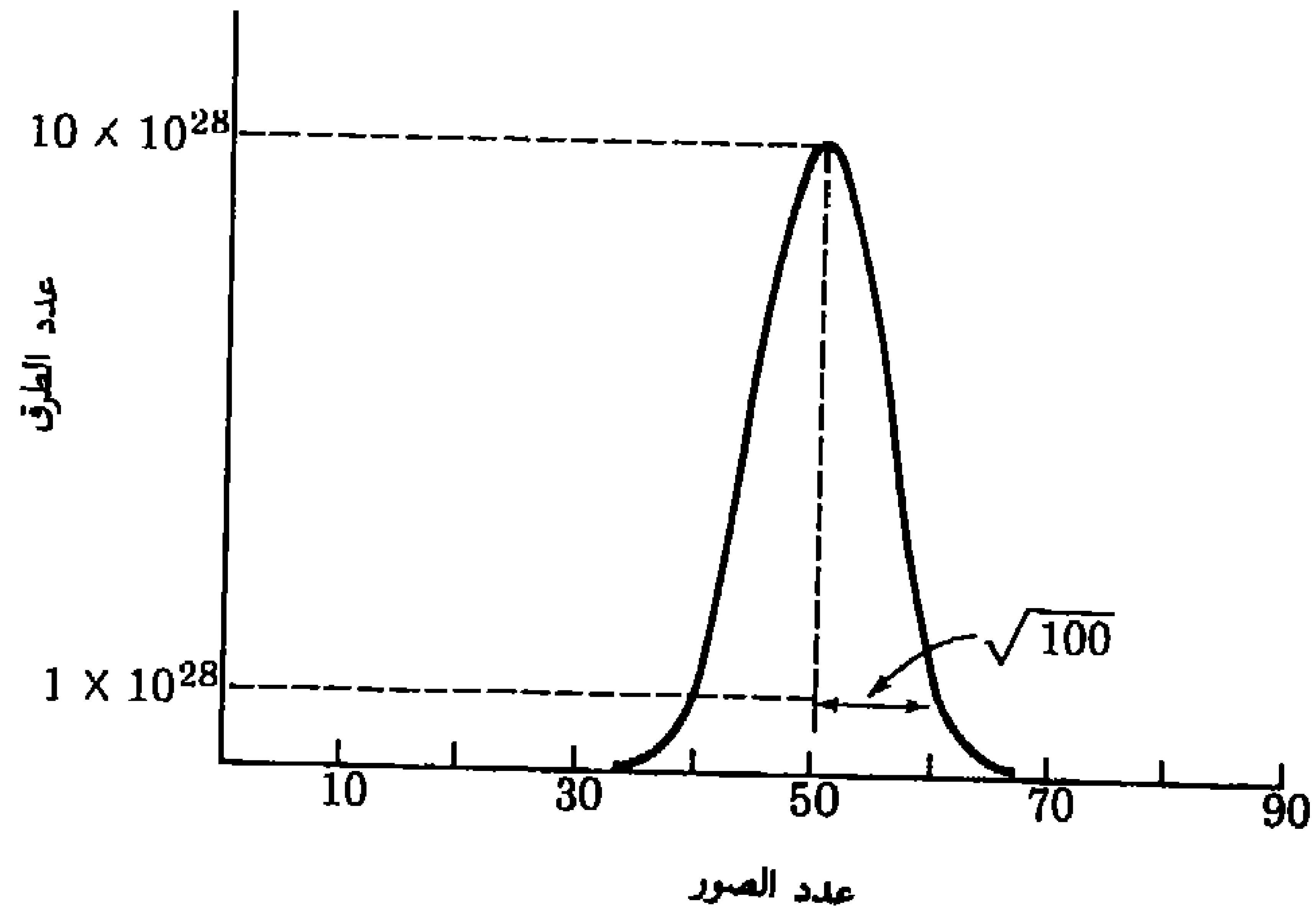
من ناحية أخرى . هناك فى الحقيقة خمس طرق مختلفة يمكن أن يحدث بها الحدث 2 . فإذا رمزنا لقطع العملة الخمس بالحروف A ، B ، C ، D ، E فإن هذه الطرق تكون كالتالى :

الطريقة	قطعة العملة	A	B	C	D	E
		طرق الحصول على صورة واحدة				
1		H	T	T	T	T
2		T	H	T	T	T
3		T	T	H	T	T
4		T	T	T	H	T
5		T	T	T	T	H

وحيث أن عدد الطرق التى يمكن أن تحقق الحدث 2 أكبر خمس مرات من عدد الطرق التى يمكن أن تحقق الحدث 1 ، فإن احتمال حدوث الحدث 2 أكبر من احتمال حدوث الحدث 1 خمس مرات . وأيضا يمكن أن يتحقق الحدث 5 بخمس طرق مختلفة . ونتيجة لذلك فإن احتمال حدوث الحدثين 2 ، 5 متساو ، وواضح أن احتمال حدوث كل منهما أكبر خمس مرات من احتمال حدوث الحدث 1 أو 6 .

بنفس الطريقة يمكننا إثبات أن احتمالى حدوث الحدثين 3 و 4 متساويان ، وأن كلا من هذين الحدثين يمكن أن يتحقق بعشر طرق مختلفة . إذن احتمال حدوث الحدثين 3 و 4 ضعف احتمال حدوث الحدثين 2 و 5 وعشرة أضعاف احتمال حدوث الحدثين 1 و 6 . فإذا كنت مقامرا ، فإن من الواضح لك الآن على أى حدث يجب أن تضع نقودك ، إذا لم يكن هناك تأرجح معين .

يمكننا تعميم ذلك على أى موقف يستخدم فيه عدد أكبر من قطع العملة . لنفرض أننا ألقينا 100 قطعة عملة وليس 5 . فى هذه الحالة ، كما فى الحالة السابقة ، هناك طريقة واحدة لأن تظهر الصورة (أو الكتابة) على الوجه العلوى لجميع القطع . ولكن عدد الطرق التى يمكن أن تحدث بها التوافقيات الأخرى يصبح كبيرا بدرجة غير معقولة فى هذه الحالة ، وهذا موضح فى الشكل ١٢ - ١٣ . لاحظ أن عدد الطرق التى يمكن أن تظهر بها 50 صورة على الوجه العلوى هو حوالى 10×10^{28} . وكما ترى ، فإن أرجحية ظهور الصورة (أو الكتابة) على الوجه العلوى لجميع القطع صغيرة جدا ويمكن إهمالها .



شكل (١٢ – ١٣)
عدد الطرق التى يمكن بها الحصول على العدد المبين من الصور عند إلقاء 100 قطعة عملة .

وفى الحقيقة فإن العدد الكلى للطرق التى تحدث بها جميع التوافقيات الممكنة من الصورة أو الكتابة هو حوالى 1×10^{30} . إذن ، احتمال ظهور الصورة على الوجه العلوى لجميع القطع هو 1 من 10^{30}. فإذا ألقيت القطع مرة فى كل 10 s لمدة 10^{22} yr فإن فرصتها لأن تظهر على الوجه العلوى لجميع القطع مرة واحدة ستكون حوالى 10% . ولجميع الأغراض العملية تعتبر فرصة ظهور الصورة على الوجه العلوى لجميع القطع صفرا . وكما نرى من الشكل ١٢ – ١٣ فإن الإحتمال الوحيد الممكن حدوثه حقيقة هو أن تظهر أعداد متساوية من الصورة والكتابة على الأوجه العلوية للقطع .

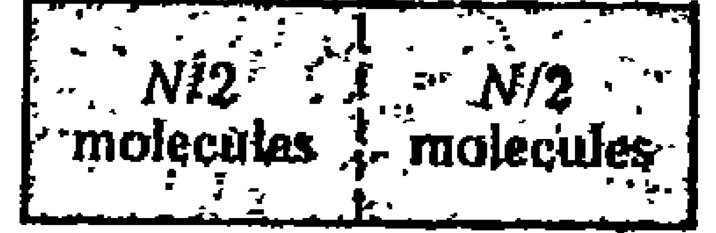
وإذا اعتبرنا 10^6 قطعة بدلا من 10^2 فإن الموقف يصبح أكثر تعقيدا . ولكن يمكننا تلخيص جميع هذه النتائج بطريقة بسيطة جدا . لاحظ من الشكل ١٢ – ١٣ أن الخط البيانى يقل إلى حوالى عشر قيمته العظمى عند العددين التاليين للصور : 40 و 60 ولكى نعطى تقديرا لاتساع الذروة ، يمكننا أن نقول أنها تمتد من(10—50) إلى (50+10)أى أنك إذا ألقيت 100 قطعة فإن عدد الصور التى يجب أن تظهر على الوجه العلوى هو حوالى 50 ± 10 . أما النتيجة العامة فهى كالتالى :

إذا ألقى شخص عددا من قطع العملة قدره N ، فإن العدد المتوقع من الصور سيكون حوالى* :

$$\frac{N}{2}\pm\sqrt{N}$$

* بدقة ، إذا كان N كبيرا فإن عدد الصور سوف يقع فى هذا المدى بنسبة 95.3%

وفى حالة 10^6 قطعة عملة يجب أن نتوقع ظهور عدد قدره $500,000 \pm 1000$ على الوجه العلوى . لاحظ أن هذا التقدير دقيق جدا ، وهو يبين لنا أن العدد المتوقع من الصور يقع بين 501,000 و 499,000 ، وهو مدى ضيق جدا فى الواقع . وكما هو واضح ، عندما يصبح عدد قطع العملة كبيرا جدا ، سنجد أن الإنحراف المئوى عن المتوسط صغير جدا .



شكل (١٢ – ١٤)
ماهو احتمال أن تظهر جميع الجزيئات فى أحد جانبى الصندوق ؟

هذا المثال عن قطع العملة هو مثال نموذجى لما يحدث عموما فى الكون الذى نعيش فيه . فعندما تترك الأحداث لتتم بنفسها دون تدخل خارجى فإنها تحدث بالصدفة ولذلك فإن قوانين الإحتمال التى تنطبق على قطع العملة تنطبق كذلك على هذه المواقف . فمثلا ، لنفرض أن لديك صندوقا يحتوى على جزيئات غازية كما هو موضح فى الشكل ١٢ – ١٤ ، ولنفرض أن عدد الجزيئات فى الصندوق هو 10^{20} . (ملحوظة : تركيز الجزيئات فى الهواء يساوى حوالى 3×10^{19} molecules/cm³) . ونحن نسأل الآن : ماهى الفرص لأن تتكدس جميع هذه الجزيئات فى أحد نصفى الصندوق ؟

يمكننا توضيح هذا الموقف بسهولة بالإستعانة بالنتائج التى توصلنا اليها فى مثال قطع العملة . ولكى نجعل الموقفين متشابهين ، لنفرض أن الجزيئات الموجودة فى الجانب الأيسر من الصندوق هى جزيئات « صورة » ، وأن الجزيئات الموجودة فى الجانب الأيمن هى جزيئات « كتابة » . وتبين لنا النتيجة العامة التى توصلنا اليها سابقا أن عدد جزيئات « الصورة » يساوى حوالى $\frac{1}{2}N \pm \sqrt{N}$. وفى هذه الحالة يكون عدد جزيئات « الصورة » حوالى :

$$50,000,000,000,000,000,000 \pm 10,000,000,000$$

لاحظ أن الإنحراف المتوقع صغير جدا ، إذ يبلغ فقط $10^{10}/5\times10^{19}$ أو حوالى جزء واحد فى كل 5 بليون جزء . ولهذا يمكننا أن نعتبر أن كلا من نصفى الصندوق يحتوى عمليا على نفس العدد من الجزيئات . وبالطبع ليست هناك أى فرصة على الإطلاق لأن تتحرك الجزيئات تلقائيا لتتكدس فى احدى جانبى الصندوق .

وهذه الاعتبارات ذات أهمية أساسية وجوهرية فى جميع العمليات التلقائية ، ويمكننا على أساسها أن نتنبأ بأن الحركة الحرارية (أو أى اضطراب عشوائى آخر) تغير حالة النظام الدينامى الحرارى من النظام إلى الفوضى . وكمثال تقريبى لذلك ، اعتبر حالة قطع العملة المائة مرة ثانية . لنفرض أننا رتبنا هذه القطع جميعا بحيث كانت الصور إلى أعلى . يقال عندئذ أنها على درجة عالية من النظام . لنحركها الآن نوعا معينا من الحركة شبيها بالحركة الحرارية العشوائية بأن نرجها . عندئذ سوف يختل النظام بسرعة ولن تعود قطع العملة إلى حالة النظام الابتدائية أبدا .

بالمثل فى حالة جزيئات الغاز فى الصندوق المبين فى الشكل ١٢ - ١٤ . لنفرض أننا رتبنا النظام بوضع جميع الجزيئات فى أحد جانبى الصندوق . ولكن إذا سمحنا للجزيئات بأن تتحرك حركة حرارية تلقائيا فإنها ستصبح غير مرتبة وتملأ الصندوق كله ، ولن تعود تلقائيا إلى حالة الترتيب الابتدائية أبدا .

ويعتبر مفهوم النظام والفوضى إساسيين فى هذه المناقشة . ويمكننا مقارنة درجة فوضى حالتين بطريقة بسيطة . فإذا كانت الحالة تحدث بطريقة واحدة فقط ، فإنها تكون حالة عالية النظام ، وفى مثل هذه الحالة يجب أن يوضع كل جزىء (أو جسيم آخر) بطريقة واحدة مضبوطة . أما حالة الفوضى فإنها يمكن أن تتحقق بطرق كثيرة . فإذا أخذنا هذه الحقائق فى الإعتبار ، يمكننا أن نجد علاقة بين درجة الفوضى واحتمال (أو عدد طرق) تحقيق الحالة . وعليه فإن حالة أعلى فوضى هى الحالة الأكثر احتمالا ، إذا أنها تحدث بأكبر عدد من الطرق . فمثلا ، احتمال سقوط عدد N من قطع العملة بحيث تظهر الصورة على جميع الأوجه العليا صغيرة جدا ، ومن ثم فإن هذه الحالة منخفضة الفوضى جدا . وقد رأينا مما سبق أن الأنظمة تتحرك تلقائيا تجاه الحالات عالية الفوضى .

هناك أمثلة كثيرة يمكن أن نسوقها لتوضيح هذا النوع من السلوك . ويستنتج منها أن النظام المكون من عدد كبير من الجزيئات يتبع القانون التالى :

صورة أخرى للقانون الثانى

> إذا سمح للنظام بالتغير تلقائيا من حالة إلى أخرى ، فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد - أو ، فى أحسن الأحوال ، لاتقل - درجة الفوضى فيه .

وهذا القانون الطبيعى ، الذى ينطبق على الأعداد الكبيرة من الجزيئات ، هو صورة بديلة للقانون الثانى للديناميكا الحرارية . وسوف نرى فى الجزء التالى أن هناك علاوة على ذلك طريقة أخرى لصياغة هذا القانون .

١٢ - ١٠ الانتروبيا

يمكن التوصل إلى مضمونى النظام والفوضى بطريقتين مختلفتين تماما . وقد عرف منذ وقت مبكر فى تاريخ الديناميكا الحرارية أن هناك كمية تسمى الانتروبيا ذات فائدة كبيرة فى الحسابات الدينامية الحرارية ، وتعرف هذه الكمية بدلالة سريان الحرارة ودرجة الحرارة المطلقة . وينطبق تعريف الانتروبيا على الأنظمة التى تعانى تغيرا انعكاسيا فى الحالة . (طبقا للتعريف ، التغير الانعكاسى هو تغير يحدث بطريقتين متماثلتين فى الاتجاهين الأمامى والخلفى) فمثلا ، عندما يحدث التغير انعكاسيا من الحالة A إلى الحالة B . تأخذ متغيرات حالة النظام قيما معينة فى كل

خطوة من خطوات التغير . وفى العملية العكسية ، أى عندما يحدث التغير من الحالة B إلى الحاله A تكرر متغيرات الحالة نفس هذه الخطوات ولكن بترتيب عكسى .

يمثل التغير فى انتروبيا النظام بالرمز ΔS . وعندالانتقالمن الحالة A إلى B فى عملية انعكاسية ، تنتقل كمية من الحرارة ΔQ إلى النظام عند درجة الحرارة المطلقة T ، وعندئذ يكون التغير فى انتروبيا النظام كالتالى :

تغير الانتروبيا

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \qquad (٦ - ١٢)$$

وكما نرى ، فإن الكمية ΔS تكون موجبة (أى أن النظام يكتسب انتروبيا ، إذا كانت الحرارة تنتقل إلى النظام . لاحظ أن T هى درجة الحرارة المطلقة .

علاوة على ذلك ، يمكننا أن نثبت أن الانتروبيا متغير حالة . فعند الظروف المتماثلة تكون قيمة الانتروبيا ثابتة دائما . أى أن الانتروبيا تشبه تماما P ، V ، T فى هذا الشان . وحيث أن الانتروبيا متغير حالة ، من المفيد إذن استخدام هذه الكمية فى الديناميكا الحرارية لوصف الأنظمة والعمليات .

وقبل أن تستخدم الانتروبيا على نطاق واسع فى الديناميكا الحرارية ، قدم فرع الكيمياء والفيزياء المعروف باسم الميكانيكا الإحصائية رؤية أخرى لهذه الكمية . ففى علم الميكانيكا الإحصائية يوصف سلوك الغازات والسوائل والجوامد بدلالة السلوك الإحصائى للذرات والجزيئات . وتعتبر النظرية الحركية للغازات ، على سبيل المثال ، جزءا من الميكانيكا الإحصائية . وقد ناقشنا فى الجزء السابق سلوك الجزيئات من وجهة نظر الميكانيكا الإحصائية .

وبعد سنوات من العمل الدائب أدت ابحاث ونتائج بولتزمان وجيبس وكثيرين آخرين إلى توحيد الديناميكا الحرارية والميكانيكا الإحصائية . وقد كان تفسير معنى الانتروبيا بدلالة النظام والفوضى واحدا من النتائج الأساسية لهذا التوحيد ، وكانت النتيجة النهائية كالتالى.

لنفرض أن لدينا نظاما يمكنه أن يصل إلى حالة معينة بطرق مختلفة عددها Ω حيث Ω هو حرف أوميجا الكبيرة . (فى حالة النظام المكون من 100 قطعة عملة ، $\Omega = 1$ فى حالة ظهور الصورة على الوجه العلوى لجميع القطع ، $\Omega \approx 10^{29}$فى حالة ظهور أعداد متساوية من الصورة والكتابة على الأوجه العلوية) . وقد اثبت أن انتروبيا النظام هى :

العلاقة بين الانتروبيا والفوضى

$$S = k \ln \Omega \qquad (\text{١٢} - \text{٧})$$

حيث تمثل ln اللوغاريتم الطبيعى ، k ثابت بولتزمان .

لاحظ ماتبينه لنا المعادلة (١٢ – ٧) . فإذا كانت حالة النظام يمكن أن تتحقق بطريقة واحدة فقط فإن 1 = . ولكن لوغاريتم 1 يساوى صفرا ، إذن انتروبيا هذه الحالة غير المحتملة بدرجة عالية تساوى صفرا . أما إذا كانت الحالة يمكن أن تتحقق بطرق كثيرة ، فإن Ω ستكون كبيرة . إذن انتروبيا هذه الحالة المحتملة بدرجة عالية كبيرة .

لنتذكر الآن أن الحالة عالية النظام يمكن أن تتحقق بعدد صغير من الطرق ، ولكن الحالة عالية الفوضى يمكن أن تتحقق بعدد كبير من الطرق . علاوة على ذلك تبين لنا المعادلة (١٢ – ٧) أن الانتروبيا مقياس للفوضى . فكلما كانت حالة النظام عالية الفوضى ، كلما كانت انتروبيا النظام كبيرة . وحيث أن الانتروبيا متغير حالة يقيس فوضى النظام ، فإن من الممكن أن نعيد صياغة القانون الثانى للديناميكا الحرارية بطريقة اخرى :

القانون الثانى بدلالة الانتروبيا

عندما تتغير حالة النظام المعزول . فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الانتروبيا ، أو تظل ثابتة فى أحسن الاحوال .

ويبين المثال التوضيحى التالى كيف يمكن حساب التغير فى الانتروبيا فى عملية .

مثال توضيحى ١٢ – ٦ : مامقدار التغير فى الانتروبيا عند انصهار مكعب من الثلج كتلته 20 g فى درجة 0°C ؟

طريقة الحل . من المعادلة (١٢ – ٦) :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

لاحظ أن T هى درجة الحرارة المطلقة ، وفى هذه الحالة $T = 273$ K . وحيث أن كمية الحرارة اللازمة لصهر جرام واحد من الثلج هى 80 cal ، إذن :

$$\Delta Q = (20\ \text{g})(80\ \text{cal/g})(4.184\ \text{J/cal}) \approx 6700\ \text{J}$$

ومنه :

$$\Delta S = \frac{6700\ \text{J}}{273\ \text{K}} = 24.5\ \text{J/K}$$

لاحظ أن الانتروبيا قد ازدادت عندما تحول الثلج إلى ماء ، وتعتبر هذه الزيادة مقياس للزيادة فى فوضى جزيئات الماء H_2O .

١٢ – ١١ الموت الحرارى للكون

تحدث جميع التغيرات التلقائية بحيث تزداد الفوضى فى الكون . وهذه ببساطة هى صيغة للقانون الثانى مطبقة على الكون ككل . وسنرى فى الفصل التاسع والعشرين أن الكون كله – طبقا لأحدث النظريات – كان فى يوم من الأيام كرة واحدة هائلة الحجم . يبلغ قطرها عشرة أضعاف قطر الشمس وفى ذلك الوقت . أى فى بداية الزمن ، كان الكون عبارة عن كرة من الطاقة ساخنة بدرجة لايمكن تصورها . وخلال بلايين السنين التى مرت منذ ذلك الحين تمدد الكون ادياباتيا مع انطلاق حوافه الخارجية فى الفضاء بسرعات عالية تقترب من سرعة الضوء .

وتنطبق قوانين الديناميكا الحرارية على هذه العملية التى استغرقت حوالى ١١ بليون سنة . وفى خلال ذلك الزمن كانت الطاقة تنتقل باستمرار من المناطق الساخنة إلى الباردة وبالطبع كان ذلك مصحوبا بزيادة الفوضى والانتروبيا فى الكون وكانت النتيجة الحتمية لذلك أن أصبحت الطاقة الحرارية ، وجميع أنواع الطاقة عموما ، أقل نفعا فى المتوسط . هذا لأن درجة الحرارة الابتدائية لهذه الكرة النارية كانت تنخفض باستمرار . ومع ذلك فلازالت هناك بقع ساخنة محلية فى مواضع معينة فى الشمس والنجوم . الا أن درجة حرارة الجزء الاعظم من الكون قد انخفضت إلى حد كبير تحت درجات الحرارة المعتادة ، إذ يصل متوسط درجة حرارة الغاز فى أجواء الفضاء البعيدة إلى حوالى 3 K .

ولكننا محظوظون على الأرض . فلازالت الشمس القريبة من كوكبنا تمدنا بفيض هائل من الطاقة . وتنتقل الطاقة من الشمس الساخنة الينا بالإشعاع . ونحن نستفيد من هذه الطاقة الإشعاعية فى زراعة النباتات ، وهذه بدورها تستخدم كمصادر للطاقة اللازمة لنا وللمخلوقات المختلفة التى تعيش على الأرض . وكما وضحنا سابقا فإن الشمس هى المصدر الأساسى للطاقة التى نستخدمها ، باستثناء الوقود النووى . لاحظ أن فائدة الشمس هى نتيجة لدرجة حرارتها العالية جدا . وعندما تبرد الشمس فإنها سوف تشع كمية أقل من الطاقة ، ومن المتوقع أن تفقد الشمس مصدرها الأساسى للطاقة خلال بلايين قليلة من السنين .

وخلال ذلك الزمن سوف تزداد انتروبيا الكون باستمرار ، وفى نفس الوقت سوف تستمر الشمس والأجسام الساخنة الأخرى فى فقد الانتروبيا بمعدل قدرة $\Delta Q/T_h$ حيث ΔQ كمية الحرارة التى يفقدها الجسم الساخن فى الثانية عند درجة حرارة قدرها T_h وبالرغم من أن الاجزاء الباردة فى الكون سوف تستقبل هذه الطاقة ، فإنها سوف تمتص هذه الحرارة عند درجة حرارة أقل هى T_c . نتيجة لذلك سوف تكتسب

هذه الاجسام الباردة كمية من الانتروبيا $\Delta Q/T_c$ أكبر من كمية الانتروبيا التى يفقدها الجسم الساخن $\Delta Q/T_h$. إذن ، سوف تستمر انتروبيا وفوضى الكون فى الزيادة نتيجة لانخفاض درجة حرارة الأجسام الساخنة وارتفاع درجة حرارة الأجسام الباردة .

ويمكننا أن نتخيل ما سوف يحدث عندما تتساوى درجات حرارة جميع الأجسام فى الكون . عندئذ لن يحدث أى انتقال للحرارة ، وسوف تصل الفوضى (والانتروبيا) فى الكون إلى القيمة القصوى . وبالرغم من أن الطاقة الأصلية للكون لازالت ثابتة ، فإن الطاقة سوف تصبح عديمة الفائدة . وعندئذ لن تنمو النباتات لعدم وجود جسم ساخن يمدها بالضوء ، ولن تعمل المحركات لعدم وجود مكان بارد يمكن تصريف الحرارة اليه . أى أن الحياة سوف تتوقف تماما فى كل مكان فى الكون . وفى هذه الحالة يكون الكون قد وصل إلى مايعرف بالموت الحرارى .

ولحسن الحظ فإن هذا لن يحدث لبلايين قادمة من السنين . وفى الحقيقة فإننا لسنا متأكدين اطلاقا من أن هذا قد يحدث فى أى وقت . وسترى فى الفصل التاسع والعشرين أن هناك احتمالا لأن ينكمش الكون فى المستقبل مرة ثانية ليصبح كرة نارية ملتهبة كما كان فى البداية . ولكن هذه قصة أخرى سوف نؤجل مناقشتها إلى الفصل الأخير من هذا الكتاب .

ملخص

الديناميكا الحرارية هى ذلك النوع من العلم الذى يصف سلوك المادة بدلالة متغيرات حالتها ، وهى أساسا الضغط ودرجة الحرارة والحجم والطاقة الداخلية والانتروبيا . متغير الحالة هو أية كمية تعتمد فقط على الحالة الماكروسكوبية لأى نظام فيزيائى . تحت الشروط الماكروسكوبية المتماثلة ، يكون لكل متغير من متغيرات الحالة قيمة محددة واحدة . الحرارة والشغل ليسا متغيرى حالة .

القانون الأول للديناميكا الحرارية هو صيغة لقانون بقاء الطاقة . يمكن صياغة هذا القانون فى صورة معادلة كمايلى : إذا كانت الحرارة ΔQ تنتقل إلى نظام ما عندما يبذل هذا النظام شغلا قدره ΔW فإن هاتين الكميتين ترتبطان بالتغير فى الطاقة الداخلية للنظام بالعلاقة :

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W$$

عندما يتغير حجم نظام بمقدار ΔV تحت ضغط خارجى قدره P فإن هذا النظام يبذل شغلا قدره $P\,\Delta V$. إذن $\Delta W = P\,\Delta V$ الشغل المبذول بواسطة النظام أثناء التغير يساوى المساحة الموجودة تحت الخط البيانى الذى يمثل هذا التغير فى الرسم البيانى P-V للنظام . إذا كان النظام يقوم بتغير دورى ، فإن صافى الشغل المبذول بواسطة النظام أثناء الدورة يساوى المساحة المحصورة داخل الدورة فى الرسم البيانى P-V

العملية الايسوثرمية هى تلك العملية التى تتم بدون تغير فى درجة حرارة النظام . فى العملية الادياباتية لاتنتقل أية حرارة إلى النظام أو منه . تنطبق المعادلة الآتية على العملية الادياباتية التى يقوم بها نظام مكون من غاز مثالى :

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$$

حيث $\gamma = c_P/c_V$ للغاز .

فى عملية تخفيف الضغط بالخنق يسمح للمائع بأن يتمدد ادياباتيا وبسرعة خلال منفث أو قرص مسامى . تؤدى هذه العملية عادة إلى تبريد المائع أثناء التمدد .

تعرف كفاءة المحرك بالعلاقة :

$$\text{كفاءة المحرك (eff)} = \frac{\text{شغل الخرج}}{\text{طاقة الدخل}}$$

وفى حالة المحرك الحرارى تتحول هذه العلاقة إلى الصورة :

$$\text{eff} = 1 - \frac{\Delta Q_{ex}}{\Delta Q_{in}}$$

حيث ΔQ_{ex} هى الطاقة المنصرفة بواسطة المحرك فى دورة واحدة ، ΔQ_{in} هى الحرارة التى يزود بها المحرك فى كل دورة . كفاءة محرك كارنو هى أقصى كفاءة ممكنة . يعمل محرك كارنو بين درجة حرارة المدخل العالية T_{in} ودرجة حرارة العادم المنخفضة T_{ex} . تعطى كفاءة محرك كارنو بالعلاقة :

$$\text{eff} = 1 - \frac{T_{ex}}{T_{in}}$$

لايمكن أن تصل كفاءة المحرك إلى 100% :

فى المبرد أو المضخة الحرارية تنتقل الحرارة من خزان حرارى بارد إلى خزان حرارى ساخن . لكى يتحقق ذلك لابد أن يزود الجهاز بالطاقة . طبقا للقانون الأول ، يجب أن تكون الحرارة المنصرفة إلى الخزان الحرارى الساخن مساوية لمجموع شغل الدخل والحرارة المنتزعة من الخزان الحرارى البارد .

يبين لنا القانون الثانى للديناميكا الحرارية اتجاه حدوث التغير التلقائى فى النظام . يمكن صياغة القانون الثانى بثلاثة طرق متكافئة

١ – تنتقل الحرارة تلقائيا من الجسم الساخن إلى البارد وليس العكس .

٢ – إذا تغيرت حالة النظام تلقائيا من حالة إلى أخرى فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الفوضى أو تظل ثابتة

٣ – إذا تغيرت حالة النظام المعزول فإن هذا التغير يتم بحيث تزدادا الانتروبيا أو تظل ثابتة .

يعطى تغير الانتروبيا ΔS لنظام ما بالطريقتين الآتيتين : إذا انتقلت كمية من الحرارة ΔQ إلى نظام عند درجة حرارة T فإن :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

وإذا كانت حالة النظام تتحقق بعدد من الطرق قدرة Ω فإن الانتروبيا تعطى فى هذه الحالة بالعلاقة الآتية :

$$S = k \ln \Omega$$

حيث k ثابت بولتزمان . تقيس الانتروبيا فوضى النظام . تزداد الانتروبيا باستمرار فى الكون ككل .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – شرح معنى متغير الحال . إعطاء أمثلة لكميات تعتبر متغيرات حالة وأمثلة أخرى لكميات لاتعتبر متغيرات حالة .

٢ – كتابة القانون الأول للديناميكا الحرارية .

٣ – حساب الشغل المبذول بواسطة نظام يتغير حجمه بمقدار معلوم ضد ضغط معلوم . استخدام الرسم البيانى $P\text{-}V$ لحساب الشغل المبذول بواسطة نظام أثناء التمدد (أو الانكماش) معلوم خطه البيانى .

٤ – تعريف التغير الايسوثرمى والتغير الأدياباتى . تطبيق القانون الأول على كل من هذين التغيرين لوصف سلوك كل من ΔQ ، ΔU ، ΔW .

٥ – شرح لماذا يسخن الغاز عندما ينضغط أدياباتيا .

٦ – وصف مانعنيه بعملية تخفيف الضغط بالخنق وشرح لماذا يبرد المائع عادة فى هذه العملية .

٧ – حساب الشغل المبذول بواسطة المحرك لكل دورة عندما يكون الرسم البيانى $P\text{-}V$ للدورة متاحا .

٨ – رسم دورة النظام على الرسم البيانى $P\text{-}V$ إذا كانت العمليات التى تتم فى الدورة مشروحة لك بالألفاظ .

٩ – كتابة كفاءة محرك حرارى بدلالة (أ) الشغل . أو (ب) الحرارة . كتابة كفاءة محرك كارنو بدلالة درجة الحرارة .

١٠ – شرح أهمية محرك كارنو ودورة كارنو .

١١ – وصف المبادىء الأساسية فى تشغيل وحدة تبريد أو مضخة حرارية من النوع ذى الضاغط .

١٢ – اعطاء بعض الامثلة لأنظمة فيزيائية تتحول تلقائيا إلى حالة أكثر فوضى . شرح لماذا لاتشاهد العملية العكسية فى الطبيعة إذا كان الأمر متعلقا بأعداد كبيرة من الجزيئات .

١٣ – استخدم العلاقة $\Delta S = \Delta Q/T$ لحساب تغير انتروبيا نظام بسيط تحت شروط أيسوثرمية .

١٤ – كتابة القانون الثانى للديناميكا الحرارية بثلاث طرق : (أ) سريان الحرارة : (ب) النظام والفوضى ، (جـ) الانتروبيا .

١٥ – شرح مانعنيه بالموت الحرارى للكون .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

حالة النظام

متغير الحالة

القانون الأول للديناميكا الحرارية : $\Delta Q = \Delta U - \Delta W$

شغل التمدد : $\Delta W = P\,\Delta V$

الرسم البيانى $P\text{-}V$

العملية الايسوثرمية

العملية الأدياباتية

$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$

عملية تخفيف الضغط بالخنق

الدورة الدينامية الحرارية ، المساحة فى الرسم البيانى $P\text{-}V$

$\text{eff} = 1 - \Delta Q_{ex}/\Delta Q_{in}$

محرك كارنو : $\text{eff} = 1 - T_{ex}/T_{in}$

المضخة الحرارية ، المبرد

القانون الثانى للديناميكا الحرارية

الأنتروبيا : $\Delta S = \Delta Q/T;\ S = k \ln \Omega$

الموت الحرارى للكون ..

اسئلة وتخمينات

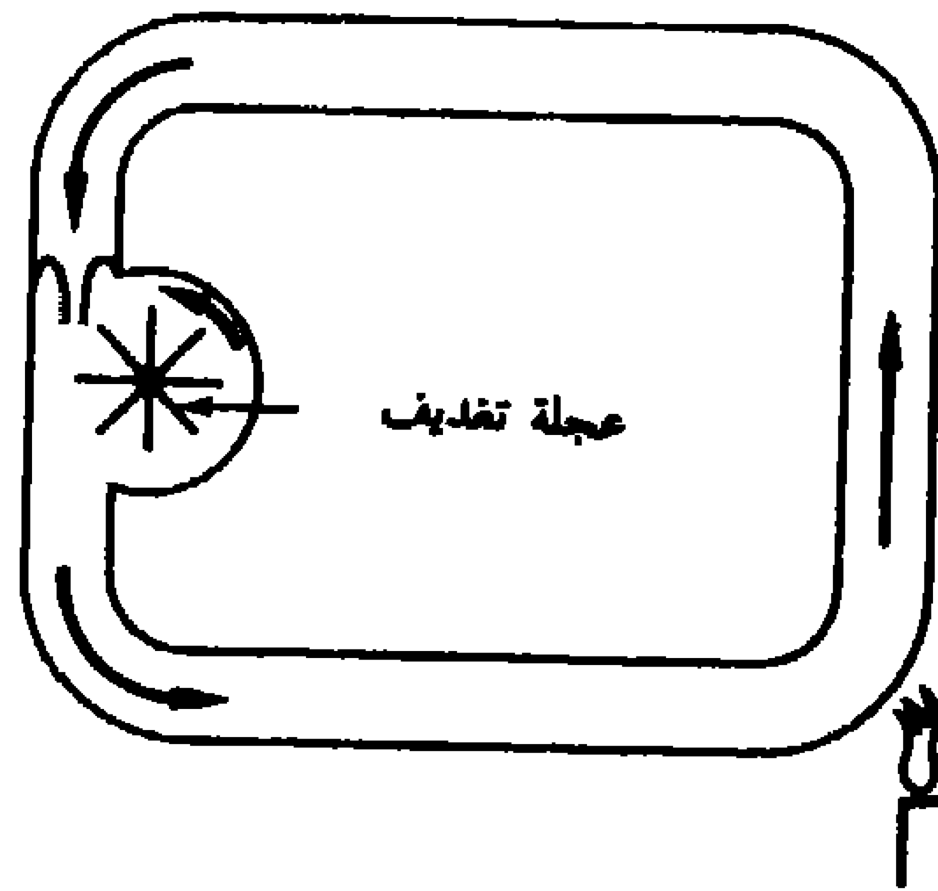
١ – طبق المعادلة $\Delta Q = \Delta U - \Delta W$ على كل من المواقف الآتية : (أ) صهر مكعب من الثلج بواسطة كمية من الماء الدافىء فى ابريق ترمس ، (ب) تسخين الماء فى ابريق ترمس بالرج الشديد ، (جـ) شخص راقد فى الفراش فى حالة غيبوبة عميقة بدون تعاطى الدواء ، (د) بيضة مسلوقة بشدة تفسد على رف .

٢ – يراد ضغط كمية من غاز مثالى فى وعاء إلى نصف حجمها الأصلى . متى يكون الشغل المبذول على الغاز أكبر ، إذا تمت العملية ايسوثرميا أم أدياباتيا ؟

٣ – قص على بعضهم القصة الآتية . لكشف تسرب الهواء من إطار نفخ هذا الأطار نفخا شديدا . وعندما أطلق الهواء من الصمام شعر الشخص الذى يقوم بذلك بأن اصبعه تتجمد نتيجة لتعرضه للهواء الخارج . هل تعتقد أن هذه القصة صحيحة ؟ دافع عن اجابتك .

٤ – الجسم البشرى مكنة معقدة بدرجة مدهشة . ناقش كلا من الآتى بالنسبة له : (أ) طاقة الدخل ، (ب) طاقة العادم ، (جـ) أنواع الشغل المبذول بواسطته ، (د) الكفاءة .

٥ – اعتبر المحرك الحرارى البسيط المبين فى الشكل م ١٢ – ١ . يتمدد السائل المسخن الموجود فى الجانب الأيمن ويرفع إلى أعلى بواسطة السائل الأبرد الموجود فى الجانب الأيسر . ونتيجة لذلك يدور السائل فى الأنبوبة فى عكس اتجاه عقارب الساعة ، وهذا يؤدى إلى إدارة عجلة التغذيف ، التى توصل عندئذ بأجهزة خارجية لبذل الشغل . اشرح ماهى العوامل التى تؤثر على كفاءة هذا المحرك . ماهو الواجب عمله لكى تصل الكفاءة إلى أعلى قيمة ؟



شكل م ١٢ – ١

٦ – درجة حرارة الجسم هى 98.6°F . وبالرغم من ذلك فإن الحرارة تنتقل من الجسم إلى الوسط الخارجى حتى إذا كانت درجة حرارته اعلى من ذلك . ألا يتعارض ذلك مع حقيقة أن الحرارة تنتقل فقط من الجسم الساخن إلى البارد ؟ بالمثل ، يمكن تبريد البطيخة بلفها فى قماش مبلل حتى فى اليوم (شديد الحرارة) . كيف تستطيع أن توفق بين هذا وبين القانون الثانى ؟

٧ – ينتج الطفل تركيبا عالى النظام عند نموه . وكل جزىء هو وحدة مركبة بعناية وترتب الجزيئات فى الجسم بطريقة عالية النظام . ألا يتعارض هذا النمو وما يصاحبه من درجة عالية فى النظام مع القانون الثانى ؟ وأخيرا ، ماهو مصدر طاقة الطفل ؟ كرر هذا السؤال فى حالة نمو النبات .

٨ – إذا ألقيت قطعتى عملة على منضدة عددا كبيرا من المرات ، فما هو العدد النسبى من المرات الذى يجب أن تظهر فيه الصورة على الوجه العلوى لكلتيهما ؟ أجر التجربة بنفسك لترى ماإذا كانت اجابتك صحيحة .

٩ – لكل نرد ستة أوجه تحمل نقطا عددها من 1 إلى 6 ، القى زوج من النرد على المنضدة . ماهى النسبة بين احتمال أن يكون مجموعة الوجهين العلوين 2 واحتمال أن يكون مجموعهما 3 ماهى هذه النسبة إذا كانت المجموعة فى الحالة الثانية 4 بدلا من 3 ؟

١٠ – اراد صبى تبريد جو مطبخ المنزل ففتح باب المبرد وتركه مفتوحا . هل لهذا أثر فعال ؟ أجب عن السؤال آخذا فى الاعتبار المدى القريب والمدى البعيد . هل يختلف الموقف إذا استخدمت الثلاجة القديمة (صندوق الثلج) بدلا من المبرد ؟

١١ – وضعت اسطوانتان يغلق كل منهما كباس قابل للحركة جنبا إلى جنب . وكانت الأسطوانتان متماثلتين فى جميع الوجوه عدا أن احداهما كانت تحتوى على الاكسجين (O_2) ، بينما كانت الاخرى تحتوى على الهليوم (He) . ضغطت الآن الأسطوانتان ادياباتيا إلى خمس حجمها الأصلى . أى الغازين ترتفع درجة حرارته أكثر من الآخر ؟

مسائل

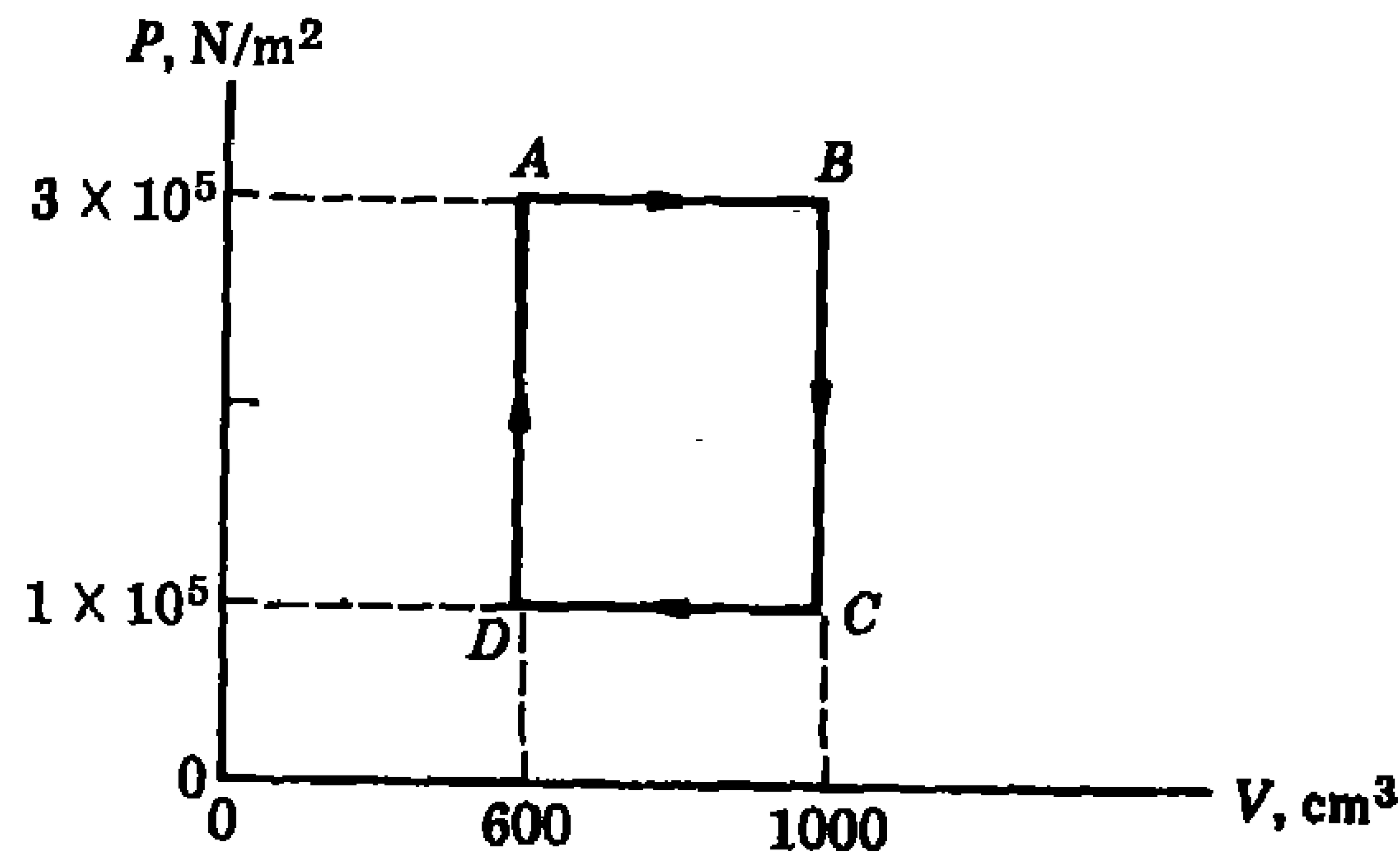
١ – (أ) ماهو مقدار التغير فى الطاقة الداخلية عندما يتحول 15 g من الثلج فى درجة 0°C إلى ماء فى درجة 0°C ؟ أهمل حقيقة أن الثلج أقل كثافة من الماء . (ب) إذا كان من الضرورى أن تأخذ تأثير الإنكماش فى الإعتبار ، هل ستكون اجابتك أصغر أو أكبر ؟

٢ – ضغط غاز مثالى فى أسطوانة ببطء إلى ثلث حجمه الأصلى . وأثناء هذه العملية ظلت درجة الحرارة ثابتة وكان الشغل المبذول فى الانضغاط هو 45 J (أ) ماهو مقدار التغير فى الطاقة الداخلية فى هذه العملية ؟ (ب) ماهى كمية الحرارة التى انتقلت إلى الغاز ؟

٣ – ضغط غاز مثالى فى أسطوانة ادياباتيا إلى ثلث حجمه الأصلى . وكان الشغل المبذول على الغاز أثناء هذه العملية 45 J . (أ) ماهو مقدار التغير فى الطاقة الداخلية فى هذه العملية ؟ (ب) ماهى كمية الحرارة التى انتقلت إلى الغاز ؟

٤ – مر غاز بالعملية الدورية المبينة فى الشكل م ١٢ – ٢ . (أ) أوجد الشغل المبذول بواسطة الغاز فى الاجزاء AB ، BC ، CD ، DE من الدورة ؟

٥ – يمثل الشكل م ١٢ – ٢ دورة دينامية حرارية لغاز مثالى . وكانت درجة حرارة الغاز عند النقطة D هى 20°C (أ) أوجد درجة الحرارة عند النقط A ، B ، C . (ب) عند إجراء الدورة هل أضيفت الحرارة فى الجزء AB ؟ BC ؟ CD ؟ DA ؟



شكل م ١٢ – ٢

٦* – فى حالة الهواء $c_V = 0.177$ cal/(g)(°C) . اعتبر كمية من الهواء فى أسطوانة مغلقة بكباس قابل للحركة تحت ضغط ثابت قدره 3.0 atm . ماهى كمية الحرارة التى يجب إضافتها إلى الغاز لكى تتغير درجة حرارته من 27°C إلى 300°C ؟ كتلة الهواء فى الأسطوانة 20 g وحجمه الابتدائى 5860 cm³ . تلميح : لاحظ أن $mc_V \Delta T$ هى الطاقة الحرارية اللازمة لتغيير درجة حرارة الهواء بمقدار ΔT .

٧* – أسطوانة سعتها $16.000\ cm^3$ مغلقة من أحد طرفيها بكباس وتحتوى على 20 g من الهواء فى درجة 30°C . دفع الكباس فجأة إلى الداخل بحيث تغير حجم الغاز إلى $1600\ cm^3$. وحيث أن الانضغاط أدياباتى ، فإن درجة حرارة الغاز ارتفعت إلى القيمة النهائية 500°C . ماهى كمية الشغل المبذول فى ضغط الغاز ؟ فى حالة الهواء $c_V = 0.177\ cal/(g)(°C)$.

٨* – تحتوى أسطوانة يغلقها كباس على 30 g من الهواء المضغوط ضغطا شديدا . وكان حجم الهواء $2400\ cm^3$ وضغطه $10 \times 10^5\ N/m^2$ ودرجة حرارته 35°C تمدد الغاز الآن أدياباتيا حتى وصل حجمه إلى $24000\ cm^3$ ، وأثناء هذه العملية بذل الغاز شغلا قدره 4100 J . ماهى درجة الحرارة النهائية للغاز ؟ افترض أن $c_V = 0.177\ cal/(g)(°C)$.

٩** – انكمشت كمية من غاز الهليوم درجة حرارتها 20°C وضغطها 1 atm أدياباتيا إلى ربع حجمها الأصلى . (أ) ماهو ضغطها النهائى ؟ (ب) ماهى درجة حرارتها النهائية ؟

١٠* – عند احتراق الجازولين يعطى كمية من الطاقة قدرها 11000 cal/g ، وتسمى هذه الكمية من الحرارة بحرارة الإحتراق . فإذا كانت سيارة تستهلك 9.5 kg من الجازولين فى الساعة بكفاءة قدرها 25% . فما هى القدرة بالحصان ؟

١١ – تتسارع سيارة كتلتها 1500 kg من السكون إلى سرعة قدرها 8.0 m/s فى زمن قدره 7.0 s . (أ) ماهى أقل قدرة بالحصان لمحرك السيارة إذا كانت جميع فواقد الاحتكاك مهملة ؟ (ب) باستخدام هذه القيمة وبفرض أن السيارة تستهلك وقودها بكفاءة قدرها 20% ، فما هى كمية الجازولين التى تحرقها السيارة فى خلال الزمن 7.0 s . ملحوظة : كمية الحرارة الناتجة من احتراق جرام واحد من الجازولين ، أى حرارة احتراق الجازولين ، حوالى 11000 cal/g .

١٢ – طاقة الخرج لوحدة نووية متوسطة الحجم لتوليد القدرة تساوى حوالى $7 \times 10^8\ W$. بفرض أن الكفاءة الإجمالية للوحدة 20% ، (أ) ماهى الطاقة التى تستهلكها الوحدة فى النهاية ؟ (ب) ماهى كمية الحرارة المنصرفة إلى نظام التبريد فى الثانية ؟ (جـ) كرر (أ) ، (ب) بالنسبة لوحدة تعمل بالوقود الاحفورى لها نفس طاقة الخرج والكفاءة .

١٣ – فى المحركات التربينية البخارية ذات الضغط العالى يسخن البخار إلى حوالى 600°C ويصرف عند درجة حرارة قريبة من 90°C . ماهى أقصى كفاءة ممكنة لأى محرك يعمل بين هاتين الدرجتين ؟

١٤ – اعطيت ثلاث قطع عمله مميزة كل منها بعلامة بحيث يمكن تتبعها . ماهو عدد الطرق المختلفة التى يمكن أن ترتب بها القطع أنفسها (صورة أو كتابة) عند إلقائها . ماهو احتمال أن تظهر الصورة على الوجه العلوى لجميع القطع ؟

١٥ – إلقى زوج من النرد على المنضدة . (أ) أى الإحتمالين أكبر : أن يكون مجموع الوجهين العلويين 3 أو 5 ؟ (ب) ماهو عدد الطرق الممكنة لأن يكون المجموع 3 ؟ (جـ) ماهو عدد الطرق الممكنة لأن يكون المجموع 5 ؟ (د) ماهو المجموع ذو الاحتمال الأكبر ؟

١٦ – عند القاء عدد N من قطع العملة المميزة بعلامات يكون عدد التوافقيات الممكنة من الصورة والكتابة هو 2^N . ماهو عدد التوافقيات الممكنة إذا استخدمت (أ) 3 قطع (ب) 5 قطع ، (جـ) 50 قطعة ؟ **تلميح** : إذا لم يكن لديك حاسب الكترونى أو كنت لاتعرف طريقة استخدام اللوغاريتمات يمكن أن تلجا إلى الطريقة المبينة على فكرة أن $a^{5q} = a^q \cdot a^q \cdot a^q \cdot a^q \cdot a^q$

١٧ – باستخدام الشرح المعطى فى المسألة ١٦ ، (أ) ماهو الاحتمال لأن تتجمع 10 نملات تتحرك حركة عشوائية فى أحد نصفى صندوق ؟ كرر ذلك فى حالة تجمع جميع النملات فى أحد نصفى الصندوق عدا واحدة فقط .

١٨ – ماهو تغير الانتروبيا بالتقريب الذى يحدث عند تبريد 15g من 20°C إلى 18°C ؟ (إفترض أن T ثابتة تقريبا) .

١٩** – خمس قطع عمله يمكن القاؤها لتظهر الصورة أو الكتابة على الوجه العلوى لكل منها . (أ) ماهى الانتروبيا فى حالة ظهور الصورة على جميع الأوجه العلوية ؟ (ب) ماهى الانتروبيا فى حالة ظهور الصورة على الأوجه العلوية لها جميعا عدا واحدة ؟

الفصل الثالث عشر

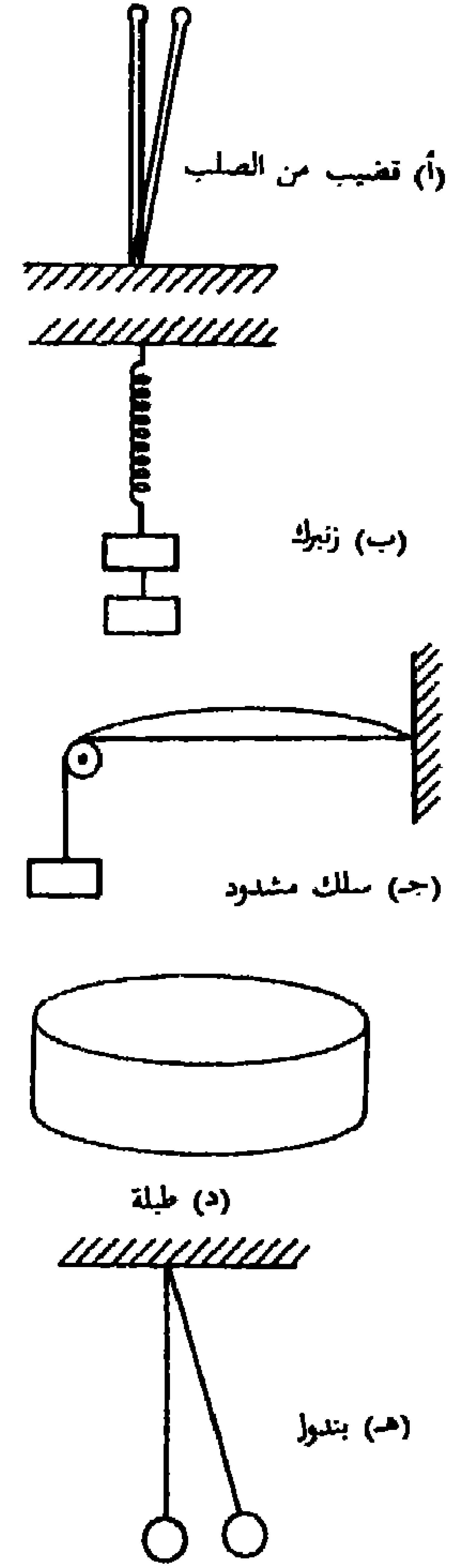
الحركة الاهتزازية

فى هذا الفصل سنعود إلى دراسة ميكانيكا الحركة استعدادا لدراسة الموجات ، مثل الموجات على وتركان ، والموجات الصوتية فى الهواء والموجات الكهرومغناطيسية التى تسير فى الفراغ . وعندما تتقدم فى دراستك لعلم الفيزياء ستجد أن حركة الموجات على نفس الدرجة من الأهمية – على الأقل – كحركة الأجسام المادية . من المهم أذن أن نفهم سلوك الموجات . وسوف نبدأ هذه الدراسة بمناقشة حركة الاجسام المادة التى تولد الموجات . وسوف يخصص الفصل التالى لدراسة بعض أنواع الموجات التى تولدها الحركات الاهتزازية التى ستناقش فى هذا الفصل .

١٣ – ١ الأنظمة المهتزة

من الممكن أن نحرك أى جسم أو نظام مرن حركة اهتزازية ، ويمثل الشكل ١٣ – ١ بعض الأمثلة العامة لاجسام وأنظمة توضح هذا النوع من الحركة . وتعتبر الأمثلة الثلاثة الأولى حالات بسيطة إلى حد ما . فإذا ازيح النظام عن الموضع المبين ثم ترك حرا فإن قوة الاستعادة المرنة سوف تسبب اهتزاز للنظام .

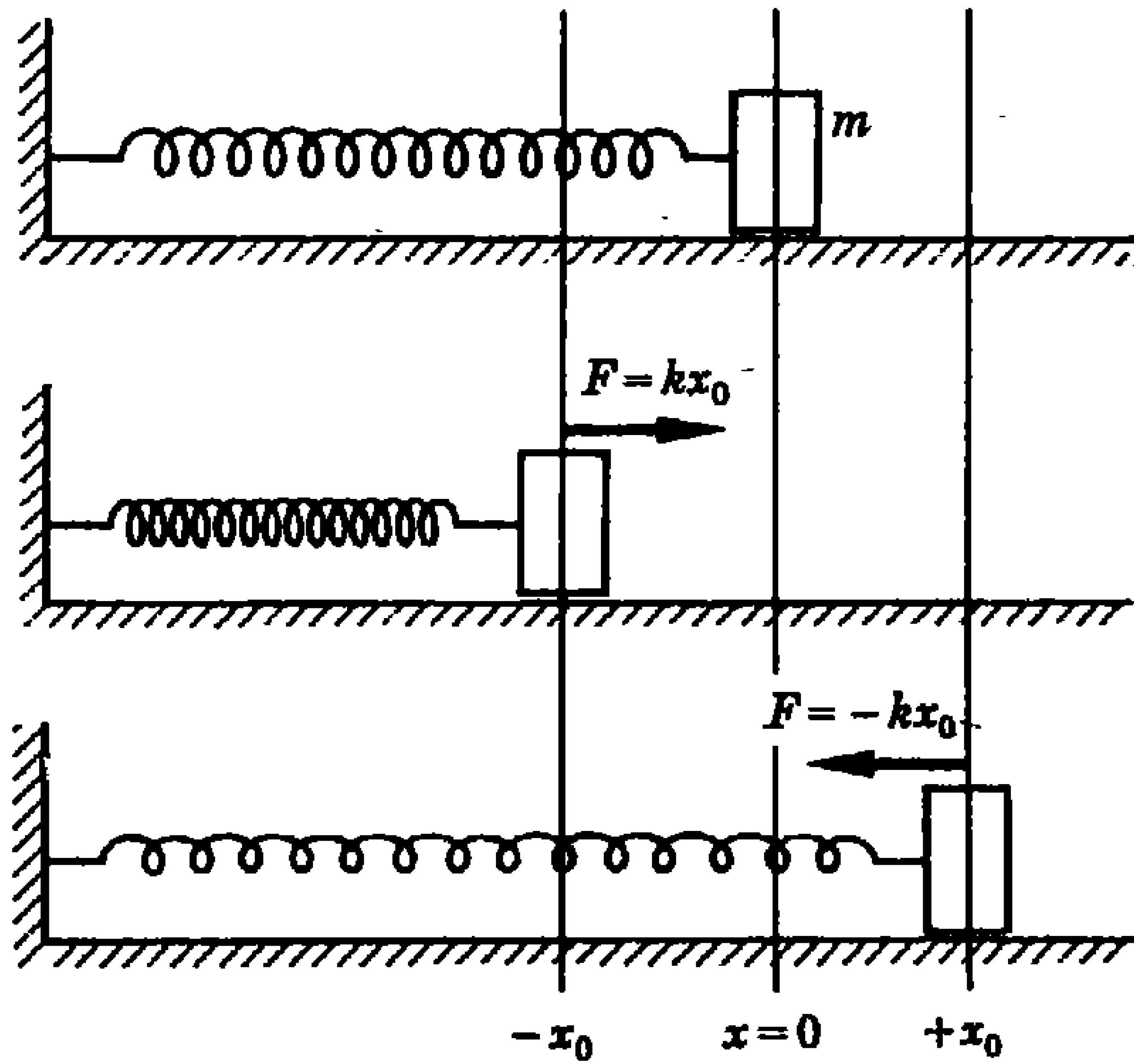
وفى المثال الرابع فى الشكل ١٣ – ١ ، وهو غشاء الطبلة ، يهتز النظام اهتزازا معقدا عندما يعانى تشوها مرنا بالطرق . وبالرغم من أن قوة الاستعادة المرنة غير موجودة فى النظام الخامس ، وهو البندول ، فإننا نعلم جيدا أن هذا النظام سوف يهتز إذا ازيح عن موضع التوازن . هناك إذن خاصية مشتركة لجميع هذه الأنظمة ، وكذلك جميع الاجسام المهتزة الأخرى . فإذا ازيح أى من هذه الأنظمة عن موضع توازنه ، فإن ذلك سيؤدى إلى ظهور قوة استعادة تحاول اعادة النظام إلى موضع توازنه .



شكل (١٣ – ١) بعض الأنظمة المهتزة النموذجية .

١٣ – ٢ الزنبرك المهتز

يعتبر الزنبرك المتصل بكتلة مثبة فى احد طرفيه واحدا من أبسط الانظمة المهتزة . وسوف نرى أن حركة هذا الجهاز مثال نموذجى لجميع الحركات الاهتزازية البسيطة . ولكن نتحاشى جميع التعقيدات الممكنة سنفترض أن الكتلة مستقرة على سطح لااحتكاكى ، كما هو مبين فى الشكل ١٣ – ٢ .



شكل (١٣ – ٢) (أ) الكتلة ، m فى حالة التوازن ، (ب) عندما ينضغط الزنبرك تختزن طاقة الوضع فيه . وعندما يترك النظام حرا تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حركة تتحول بدورها فى النهاية إلى طاقة وضع مرة أخرى عندما تصل الكتلة إلى الموضع المبين فى (جـ) . لاحظ أن الزنبرك هو الذى يعطى القوة kx .

يمثل الجزء أ من الشكل النظام فى وضع التوازن . فى هذه الحالة لن توجد أية قوة أفقية مؤثرة على الكتلة فى ذلك الموضع (كذلك فإن شد الجاذبية إلى أسفل يتزن مع دفع المنضدة إلى أعلى ، وعليه فإن محصلة القوى الرأسية المؤثرة على الكتلة تساوى صفرا دائما) .

لنفرض أننا ضغطنا الزنبرك الآن بتحريك الكتلة إلى الموضع المبين فى الجزء ب . عندئذ نكون قد بذلنا شغلا على الزنبرك اثناء عملية الانضغاط ، وهذا الشغل يختزن فى الزنبرك على هيئة طاقة وضع . ونتيجة لذلك يؤثر الزنبرك المنضغط على الكتلة بقوة تحاول أن تدفعها إلى الخلف إلى الموضع $x = 0$. والآن إذا سمحنا للكتلة بأن تتحرك بحرية ، فإن الزنبرك سوف يسبب تسارعها إلى اليمين باستمرار حتى تصل إلى الموضع $x = 0$. وعند وصول الكتلة إلى هذا الموضع تكون قد اكتسبت سرعة كبيرة ، ويكون الزنبرك قد فقد كل طاقة الوضع المختزنة فيه نتيجة للانضغاط ، ومن الواضح أن طاقة الوضع المختزنة فى الزنبرك قد انتقلت إلى الكتلة وظهرت كطاقة حركة للكتلة المتحركة .

ومن الطبيعى أن الكتلة لن تتوقف عند وصولها إلى النقطة $x = 0$ ، لأن طاقة حركتها يجب أن تفقد فى بذل الشغل قبل أن تصل إلى السكون . وعندما تبدأ الكتلة فى الحركة فى الجانب الأيمن من الموضع $x = 0$ فإن الزنبرك يبدأ فى التمدد فى نفس الوقت ، ويؤدى هذا بالطبع إلى اختزان الطاقة فيه . وعندما تصل الكتلة إلى الموضع المبين فى الجزء جـ من الشكل ١٣ – ٢ تكون قد فقدت كل طاقة وضعها فى بذل الشغل ضد الزنبرك ، وهذا يعنى أن طاقة حركة الكتلة قد تحولت بأكملها إلى طاقة وضع فى الزنبرك الممتد .

وفى هذه اللحظة يبدأ الزنبرك فى تحريك الكتلة إلى اليسار ، وعند وصولها إلى الموضع $x = 0$ تكون الطاقة قد تحولت بأكملها إلى طاقة حركة مرة أخرى . لذلك فإن الكتلة ستقوم بضغط الزنبرك إلى الموضع $x = -x_0$، حيث تتحول طاقة الحركة بأكملها إلى طاقة وضع مختزنة فى الزنبرك المنضغط . وعندئذ سوف تتكرر العملية مرة اخرى ، وإذا لم تكن هناك أية فواقد احتكاكية للطاقة فإن الكتلة سوف تهتز ذهابا وأيابا بين الموضعين $x = +x_0$ و $x = -x_0$ إلى الأبد وهذا مثال نموذجى للأنظمة المهتزة . لاحظ أن الكتلة تتذبذب ذهابا وأيابا ، وأن الطاقة تتذبذب ذهابا وأيابا بين طاقة الحركة وطاقة الوضع ، ولكن الطاقة الكلية يجب أن تظل ثابتة . لماذا ؟

تستخدم بعض المصطحات لوصف هذه الحركة الاهتزازية :

١ – **سعة الاهتزاز** هى المسافة x_0 فى الشكل ١٣ – ٢ ، أى أنها أقصى إزاحة للكتلة من موضع توازنها .

٢ – **زمن الاهتزاز** τ هو الزمن اللازم لعمل ذبذبة كاملة ، أى أنه الزمن الكلى اللازم لكى تتحرك الكتلة من نقطة البداية $-x_0$ إلى $+x_0$، ثم تعود إلى $-x_0$ مرة ثانية . (τ هو الحرف اليونانى تاو)

٣ – **تردد الاهتزاز** f هو عدد الذبذبات الكاملة التى تعملها الكتلة فى وحدة الزمن . فمثلا ، إذا كان زمن الاهتزاز 0.10 s ، فإن التردد يكون 10 cycles per seconds (cps) (أى عشر دورات فى الثانية) أى $1/\tau$. تسمى الوحدة cps فى احيان كثيرة بالهرتز Hz نسبة إلى هاينريش هرتز وهو أول من أثبت وجود موجات الراديو . ويستخدم المصطلحان cps و Hz سويا فى هذا الكتاب . (يستخدم الحرف اليونانى ν – نيو – عادة بدلا من f للدلالة على التردد) . ومن المفيد دائما أن تتذكر أن التردد f يرتبط بزمن الاهتزاز τ بالعلاقة :

وحدة هرتـز

$$f = \frac{1}{\tau} \qquad (١٣ - ١)$$

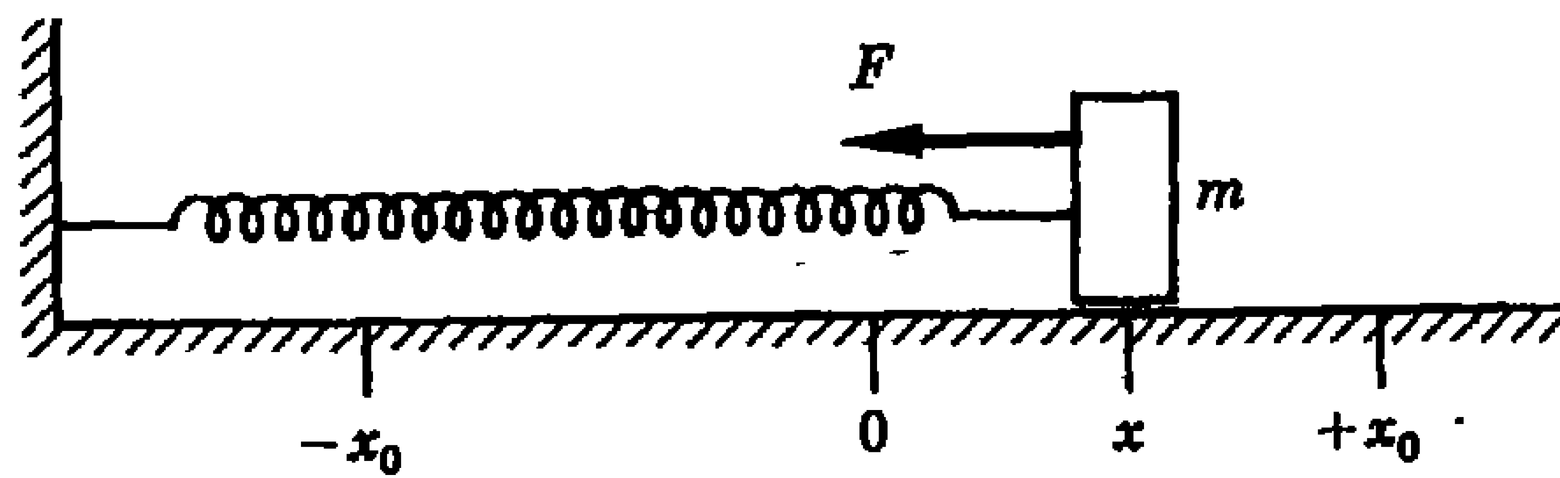
٤ – **الإزاحة** x هى المسافة بين الكتلة وموضع التوازن فى أية لحظة أثناء الاهتزاز .

١٣ – ٣ الحركة التوافقية البسيطة

لكى يمكننا مناقشة الزنبرك المهتز بطريقة كمية يجب أن نعلم كيفية تغير القوة المؤثرة على الكتلة . ومن المفيد فى هذا الخصوص أن نعلم أنه إذا لم يكن الزنبرك ممتدا أو منضغطا بدرجة كبيرة ، فإنه يتبع قانون هوك الذى ناقشناه فى الفصل التاسع . ولعلك تذكر أن تشوه النظام الذى يتبع قانون هوك يسبب ظهور قوة استعادة بتتناسب مع مقدار التشوه . وبالنسبة للحالة المبينة فى الشكل ١٣ –٣ ، يعنى ذلك أن القوة F التى يجذب لها الزنبرك الكتلة المثبتة فيه تعطى بالعلاقة :

$$F = -kx \qquad (١٣ - ٢)$$

وتبين الاشارة السالبة أن القوة متجهة فى ذلك الاتجاه الذى يؤدى إلى نقص التشوه . فعندما تكون x موجبة ، تكون القوة المؤثرة على الكتلة متجهة فى الاتجاه السالب محاولة أن تعيد الكتلة إلى موضع اتزانها . ماهو اتجاه القوة المؤثرة على m إذا كانت x سالبة ؟



شكل (١٣ – ٣)
تسبب القوة المعطاه بقانون هوك والتى تؤثر على الكتلة اهتزازها فى حركة توافقية بسيطة .

تتحرك جميع الأنظمة التى تتبع قانون هوك والتى يكون الاحتكاك فيها صغيرا نفس الحركة الاهتزازية السابق وضعها ، وهى تسمى **الحركة التوافقية البسيطة** (SHM) . وسوف نستخدم هذه الحقيقة فيما بعد عند تعميم حركة النظام « زنبرك – كتلة » على أنظمة اخرى . ويسمى الثابت k فى المعادلة (١٣ – ٢) فى جميع هذه الحالات **ثابت** الزنبرك . وحيث أن هذا الثابت يساوى F/x عدديا يمكننا إذن اعتباره مقياسا للقوة اللازمة لتشويه النظام بمقدار وحدة المسافة ، ومن الواضح أن k يجب أن يكون كبيرا للزنبرك الكز ، بينما يجب أن يكون k صغيرا للنظام سهل التشويه .

اعتبر مايحدث عندما يمتد الزنبرك من $x=0$ حيث $F=0$ إلى $x = x_0$ حيث $F=-kx_0$. فى هذه العملية يبذل الشغل ضد الزنبرك ، ويمكن حساب هذا الشغل بضرب متوسط القوة فى المسافة التى تحركها الزنبرك . ومن الواضح أن متوسط القوة يساوى نصف القوة القصوى وأن المسافة هى x_0 ومن ثم فإن الطاقة المختزنة فى الزنبرك عندما يمتد الزنبرك إلى أقصى نقطة هى :

الطاقة المختزنة فى زنبرك

$$\text{PE} = (\tfrac{1}{2}kx_0)(x_0) = \tfrac{1}{2}kx_0^2 \quad \text{طاقة الوضع القصوى}$$

وتبين لنا هذه الحقائق أن الطاقة المختزنة فى زنبرك ممتد أو منضغط بمقدار x تساوى $\frac{1}{2}kx^2$ فإذا علمنا ذلك ، يمكننا حساب سرعة الكتلة فى أى موضع بين $-x_0$ و $+x_0$. وهذا لأن الطاقة الكلية للنظام ، أى مجموع طاقتى الحركة والوضع ، يجب أن يكون ثابتا ومساويا لطاقة الوضع العظمى ، وهى بالتحديد $\frac{1}{2}kx_0^2$.

إذن :

$$\text{PE} + \text{KE} = \tfrac{1}{2}kx_0^2 = \text{طاقة الوضع القصوى} \qquad (١٣ - ٣)$$

وبالتعويض عن طاقة الوضع PE بالمقدار $\frac{1}{2}kx_0^2$ وعن طاقة الحركة KE بالمقدار $\frac{1}{2}mv^2$ نجد أن :

$$\tfrac{1}{2}kx^2 + \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}kx_0^2$$

حيث m هى الكتلة المثبتة فى طرف الزنبرك ، v سرعتها . وبتبسيط العلاقة السابقة نحصل على :

$$mv^2 = k(x_0^2 - x^2) \qquad (١٣ - ٤)$$

وعليه ، فإذا كانت سعة الاهتزاز x_0 وثابت الزنبرك معلومين يمكننا حساب سرعة الكتلة فى أى موضع ولأية إزاحة باستخدام المعادلة (١٤ – ٣) .

وبالطبع تتغير سرعة حركة الكتلة باستمرار ، وتكون السرعة أكبر مايمكن عند $x = 0$ عندما تكون الطاقة الكلية فى صورة طاقة حركة . لندرس الآن كيفية تغير تسارع الكتلة أثناء الحركة ، ويمكننا تحقيق ذلك بسهولة . ذلك أننا نعلم أن القوة غير المتزنة المؤثرة على الكتلة هى الشد فى الزنبرك ، وهذه القوة تساوى $-kx$ طبقا للمعادلة (١٣ - ٢) . وباستخدام قانون نيوتن $F = ma$ نجد أن :

$$-kx = ma$$

ومنه نجد أن تسارع الكتلة يعطى بالعلاقة :

$$a = -\frac{k}{m}x \qquad (١٣ - ٥)$$

ويلاحظ أن المعادلتين (١٣ - ٤) و (١٣ - ٥) تنطبقان على جميع الأجسام التى تتحرك حركة توافقية بسيطة (SHM) .

مثال توضيحى ١٣ - ١ : يمتد زنبرك معين بمقدار 20 cm عندما تعلق فيه كتلة قدرها 500 g . لنفرض أننا ثبتنا كتلة قدرها 2.0 kg فى أحد طرفى هذا الزنبرك ثم أزحناها مسافة قدرها 40 cm من موضع التوازن ثم تركناها . أوجد (أ) أقصى سرعة لهذه الكتلة ، (ب) أقصى تسارع لها ، (جـ) السرعة والتسارع عند $x = 10$ cm .

طريقة الحل . يجب أولا ايجاد ثابت الزنبرك k . وحيث أن الكتلة 0.50 kg تكافىء وزنا (أى قوة) تساوى 4.90 N ، إذن $k = F/x = 24.5$ N/m .

أ - تتحرك الكتلة بأقصى سرعة عندما تكون فى الموضع المركزى ، أى عند $x = 0$. وحيث أن طاقة الوضع القصوى تساوى $\frac{1}{2}kx_0^2$ أى :

$$\tfrac{1}{2}(24.5\ \text{N/m})(0.16m^2) = 1.96\ \text{J}$$

وحيث أن هذه الطاقة بأكملها توجد على هيئة طاقة حركة عند النقطة $x = 0$ إذن

$$\tfrac{1}{2}mv_{\text{max}}^2 = 1.96\ \text{J}$$

وبوضع $m = 2.0$ kg نجد أن :

$$v_{\text{max}} = 1.40\ \text{m/s}$$

ب - يكون التسارع فى نهايته القصوى عندما تكون القوة kx أكبر مايمكن أى : عندما تكون $x = x_0$، وفى هذه الحالة :

$$a_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}}}{m} = \frac{(24.5\ \text{N/m})(0.40\ \text{m})}{2\ \text{kg}} = 4.9\ \text{m/s}^2$$

جـ - عند النقطة x = 0.10 m نجد أن العجلة تساوى :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{(24.5\ \text{N/m})(0.10\ \text{m})}{2\ \text{kg}} = 1.22\ \text{m/s}^2$$

وأيضا ، حيث أن :

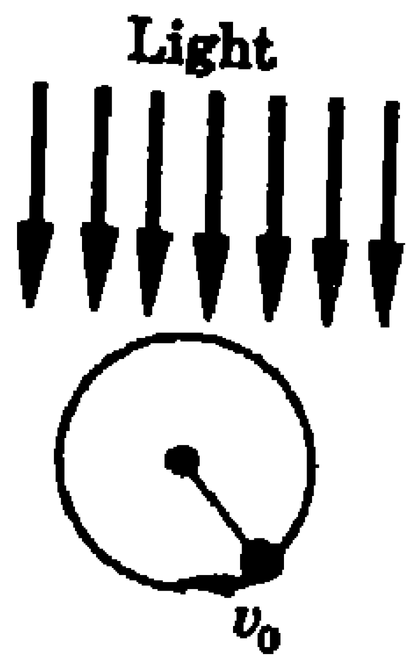
$$\tfrac{1}{2}kx_0^2 = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2$$

نجد أن :

$$1.96\ \text{J} = \tfrac{1}{2}(2\ \text{kg})(v^2) + \tfrac{1}{2}(24.5\ \text{N/m})(0.10)^2$$

ومنه :

$$v = 1.36\ \text{m/s}$$



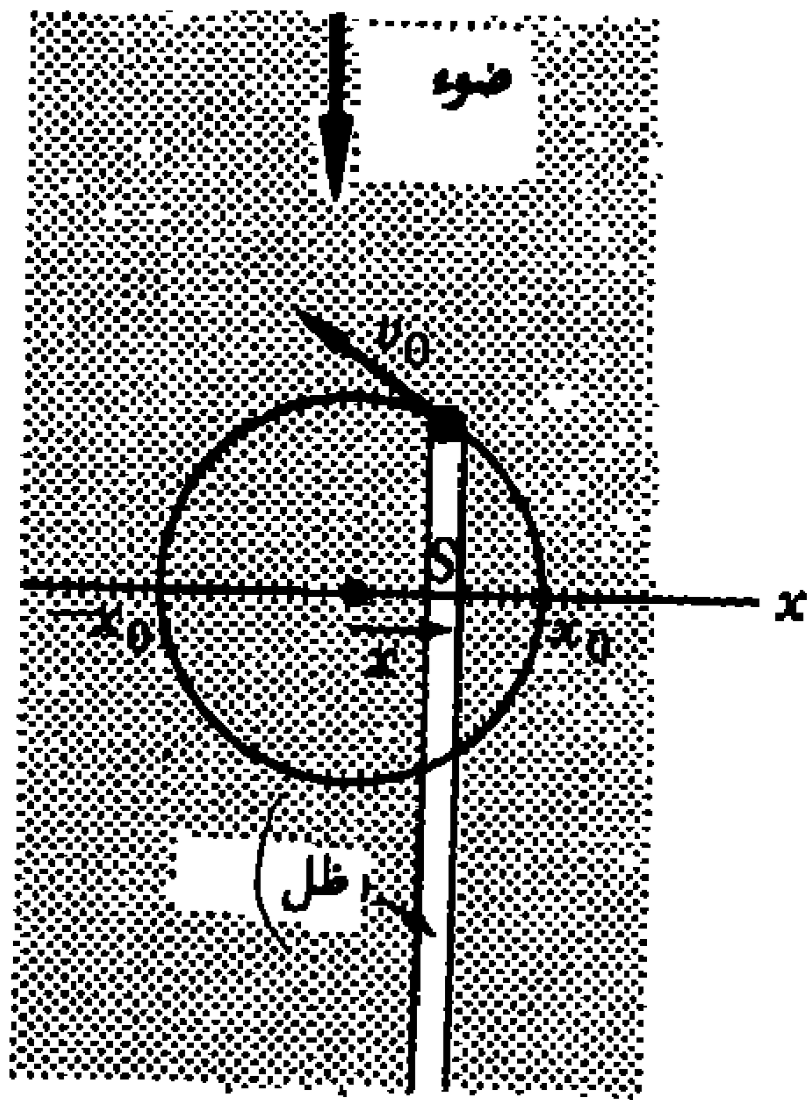


شكل (١٣ - ٤)
تدور الكرة على محيط الدائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 ويتحرك ظلها فى توافق مع الكتلة المثبته فى نهاية الزنبرك

١٣ - ٤ زمن الاهتزاز

لقد حسبنا حتى الآن كل الكميات المتعلقة بالحركة التوافقية البسيطة تقريبا ، وقد وضحنا فى الجزء الأخير كيف يمكننا ايجاد سرعة وتسارع الجسم المهتز . ومايتبقى الآن هو أن تعرف طريقة ايجاد تردد الاهتزاز .

هناك عدة طرق لايجاد تردد الذبذبات f . وتعتمد احدى أبسط هذه الطرق على التشابه بين كرة تتحرك فى مسار دائرى ، وكتلة تهتز فى نهاية زنبرك وهذا موضح فى الشكل ١٣ - ٤ . فعندما تتحرك الكرة على محيط الدائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 فإن ظلها على مستوى يقع أسفلها يتحرك ذهابا وايابا ، وقد أثبت فى النهاية أن الظل يتحرك حركة توافقية بسيطة . وفى الحقيقة إذا اختيرت السرعة v_0 بطريقة صحيحة يمكن أن يتحرك الظل فى اتساق مع الكتلة المهتزة فى نهاية الزنبرك الموضح فى الشكل .

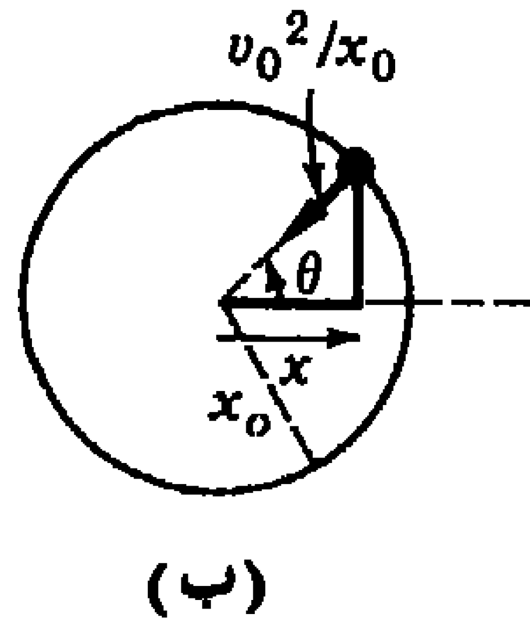


(أ)

شكل (١٣ - ٥)
تتحرك الكرة على الدائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 . والازاحة x لظل هذه الكرة تتحرك حركة توافقية بسيطة سعتها x_0 للظل
$v_0 = x_0\sqrt{k/m}$.

سنحاول الآن اثبات ذلك ثم استخدام النتائج التى نحصل عليها فى ايجاد تردد الحركة التوافقية البسيطة .

من الواضح أن الكتلة المهتزة فى نهاية زنبرك لاتتحرك بتسارع ثابت ، إذ تبين لنا المعادلة (١٣ - ٥) أن $a \sim x$ ، وعليه فإن التسارع يتغير باستمرار . ولهذا السبب فإن الحركة التوافقية البسيطة ليست بسيطة بالرغم من اسمها . ولكن استخدام التشابه بين الحركة الدائرية والحركة التوافقية البسيطة يمكن أن يساعدنا فى الحصول على نتائج هامة . ولتحقيق ذلك ارجع إلى الشكل ١٣ - ٥ .



(ب)

علمنا أن الكرة المتحركة فى مسار دائرى بسرعة لا اتجاهية ثابتة v_0 تقع تحت تأثير تسارع الجذب المركزى ومقداره v_0^2/r وهذا التسارع مبين فى الجزء ب من الشكل . ولكن نصف قطر الدائرة فى حالتنا هذه هو x_0 ، إذن يعطى تسارع الجذب المركزى فى هذه الحالة بالمقدار v_0^2/x_0 . وعندما تتحرك الكرة على محيط الدائرة ، يتذبذب ظلها ذهابا وايابا على المحور x كما هو مبين فى الجزء (أ) . ونحن ندعى أن الحركة التذبذبية للظل هى فى الواقع حركة توافقية بسيطة . ولإثبات ذلك اعتبر تسارع الظل فى اتجاه المحور x .

يلاحظ ان احداثى الظل x فى الجزء أ هو نفس الاحداثى x فى الجزء ب ، ولكن تسارع الكرة فى الاتجاه x (وتسارع الظل أيضا) هو مركبة تسارع الجذب المركزى فى اتجاه المحور x . وبالاستعانة بالجزء ب يمكننا أن نقتنع بأن مركبة التسارع فى الاتجاه x هى :

$$\text{تسارع الظل} = -\frac{v_0^2}{x_0}\cos\theta$$

وتبين لنا الاشارة السالبة أن التسارع فى هذه الحالة متجه فى الاتجاه $x-$ بالاضافة إلى ذلك نجد من الجزء ب أن $\cos\theta = x/x_0$ ، أى أن :

$$\text{تسارع الظل} = -\left(\frac{v_0^2}{x_0^2}\right)x$$

لاحظ أن هذا التسارع يشبه كثيرا التسارع فى الحركة التوافقية البسيطة المعطى بالمعادلة (١٣ — ٥) . نستنتج من هذا إذن أن :

$$\text{التسارع فى الحركة التوافقية البسيطة} = -\left(\frac{k}{m}\right)x$$

دائــرة الاسناد يمكننا إذن أن نستنتج أن حركة الظل هى نفس حركة الكتلة المثبتة فى نهاية زنبرك . ولكى تكون الحركتان متماثلتين يجب أن يكون نصف قطر الدائرة مساويا لسعة الحركة . وفى هذه الحالة يجب اختيار السرعة اللااتجاهية للكرة بحيث تكون :

$$\frac{v_0^2}{x_0^2} = \frac{k}{m}$$

أو :

$$v_0 = x_0\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (١٣ - ٦)$$

ويمكنك أن تلاحظ من السياق أن المعادلة (١٣ – ٦) حالة خاصة للمعادلة (١٣ – ٤) . لنستخدم الآن هذا التشابه بين الحركة الدائرية والحركة التوافقية البسيطة للحصول على تعبير لتردد الحركة .

وإذا أردنا حساب الزمن اللازم للكتلة المهتزة المثبتة فى الزنبرك لكى تعمل اهتزازه كاملة واحدة ، فإن هذا سيكافىء تماما حساب الزمن للكتلة المتحركة فى دائرة لكى تدور دورة كاملة . عندئذ سيكون الزمن الذى تستغرقه الكتلة المتحركة فى دائرة لكى تدور دورة كاملة على محيط دائرة نصف قطرها r أى الزمن الدورى هو :

$$\tau = \frac{2\pi r}{v_0} = 2\pi \frac{x_0}{v_0}$$

ولكننا نعلم مع ذلك من المعادلة (١٣ – ٦) أن :

$$v_0 = x_0 \sqrt{\frac{k}{m}}$$

إذن ، يعطى الزمن الدورى بالمعادلة :

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$ (١٣ – ٧) الزمن الدورى للاهتزاز

وتردد الاهتزاز f هو ببساطة $1/\tau$. وحيث أننا قد استخدمنا العلاقة $F = ma = -kx$ فى اشتقاق هذه العلاقة ، فإن وحدات k يجب أن تكون النيوتن لكل متر أو الباوند لكل قدم .

يلاحظ أن المعادلة (١٣ – ٧) هى المعادلةالعامة لزمن اهتزاز أى كتلة m تتحرك حركة توافقية بسيطة . وعليه فإن زمن اهتزاز أى نظام يتبع قانون هوك وكتلته m يعطى بالمعادلة (١٣ – ٧) ، سوف نرى فيما بعد أن هذا ينطبق على أنظمة اكثر تعقيدا من الزنبركات البسيطة .

مثال توضيحى ١٣ – ٢ : أوجد زمن اهتزاة النظام المعطى فى المثال التوضيحى ١٣ – ١ .

طريقة الحل . علمنا من المثال التوضيحى ١٣ – ١ أن :

$$k = 24.5 \text{ N/m}$$

و :

$$m = 2.0 \text{ kg}$$

بتطبيق المعادلة (١٣ – ٧) نجد أن :

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{2.0}{24.5}} \approx 1.8 \text{ s}$$

١٣ – ٥ الاهتزاز الجيبى : الحركة التوافقية البسيطة

سنحاول الآن اشتقاق معادلة رياضية بسيطة لأى كتلة تتحرك حركة توافقية بسيطة . لقد رأينا أن الظل المهتز فى الشكل ١٣ – ٥ يتحرك حركة توافقية بسيطة ، ويمكننا بسهولة ايجاد قيمة الازاحة x من الجزء ب من الشكل . نرى إذن أن :

$$x = x_0 \cos\theta$$

ولكن θ تتغير باستمرارا أثناء حركة الكرة حول محيط دائرة الإسناد . وحيث أن معادلات الحركة تنص على أن :

$$\theta = \omega t$$

إذن :

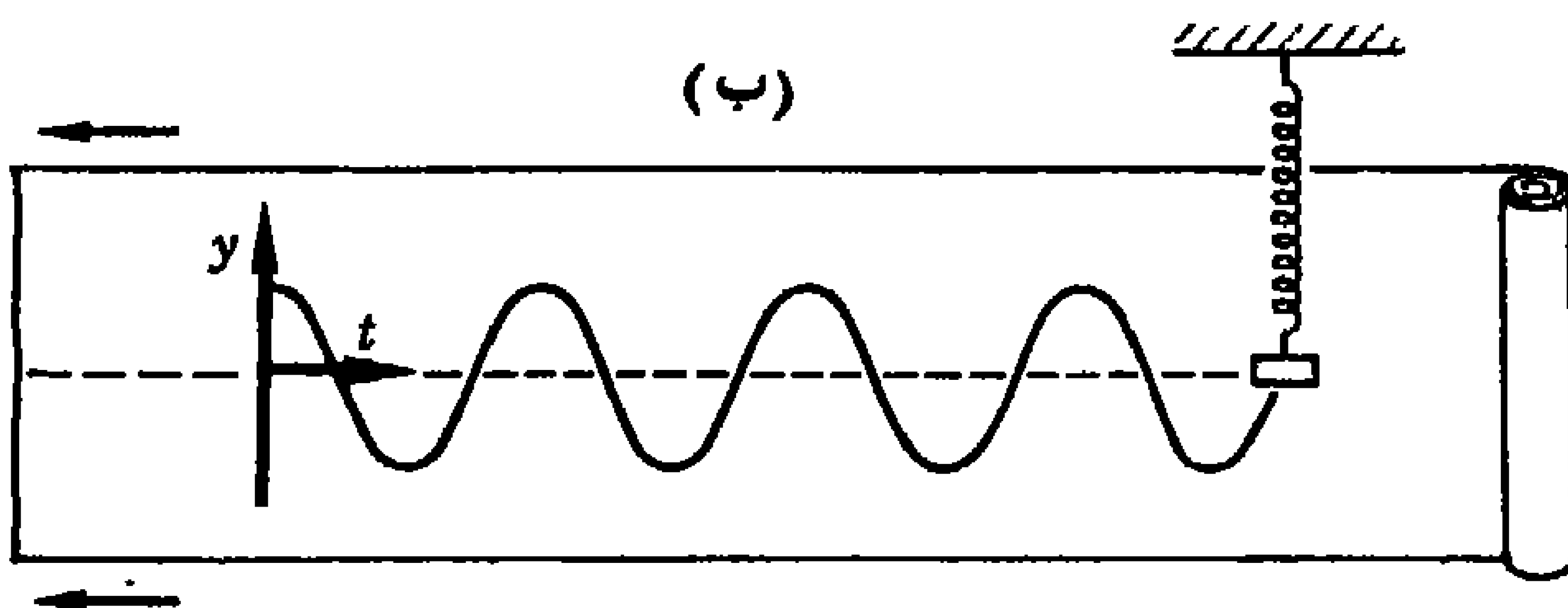
$$x = x_0 \cos \omega t \qquad (١٣ - ٨)$$

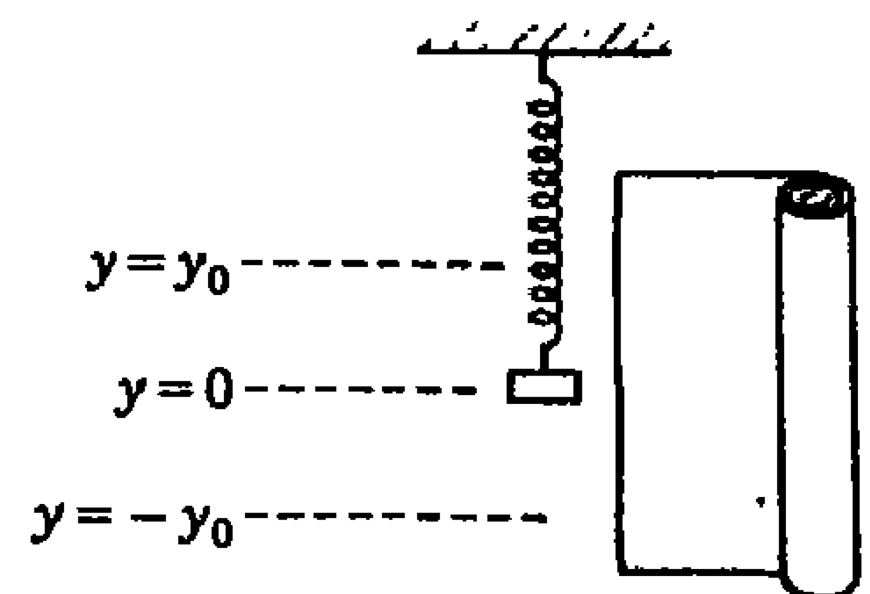
حيث تقاس السرعة الزاوية ω بالزوايا النصف قطرية فى الثانية . وإذا أردنا التعبير عن اجابتنا بدلالة f ، أى التردد بالدورات فى الثانية (أو ، فى هذه الحالة ، الاهتزازات فى الثانية) ، يجب أن نستخدم العلاقة :

$$\omega = 2\pi f \qquad (١٣ - ٩)$$

لأن 1 rev تكافىء 2π rad .

تنص المعادلة (١٣ – ٨) على أن الكتلة المهتزة فى حركة توافقية بسيطة تفعل مايفعله جيب تمام الزاوية ωt . ولكى ترى مايسلتزمه هذا النوع من الاهتزاز ، اعتبر التجربة الموضحة فى الشكل ١٣ – ٦ .





شكل (١٣ – ٦)
ترسم الكتلة المهتزة منحنى جيب تمام كدالة للزمن .

يمثل هذا الشكل ثقلا معلقا فى زنبرك . فإذا رفع الجسم إلى الموضع y_0 ثم ترك حرا ، فإنه سوف يتحرك حركة توافقية بسيطة سعتها y_0 . يوضع شريط من الورق خلف الجسم لكي يسجل عليه الجسم مواضعه اثناء اهتزازه إلى أعلى وإلى اسفل . فإذا جذب الشريط إلى اليسار بمعدل ثابت فإن الجسم سوف يرسم عليه منحنى يمثل حركته . وهذا موضح فى الجزء السفلى من الشكل .

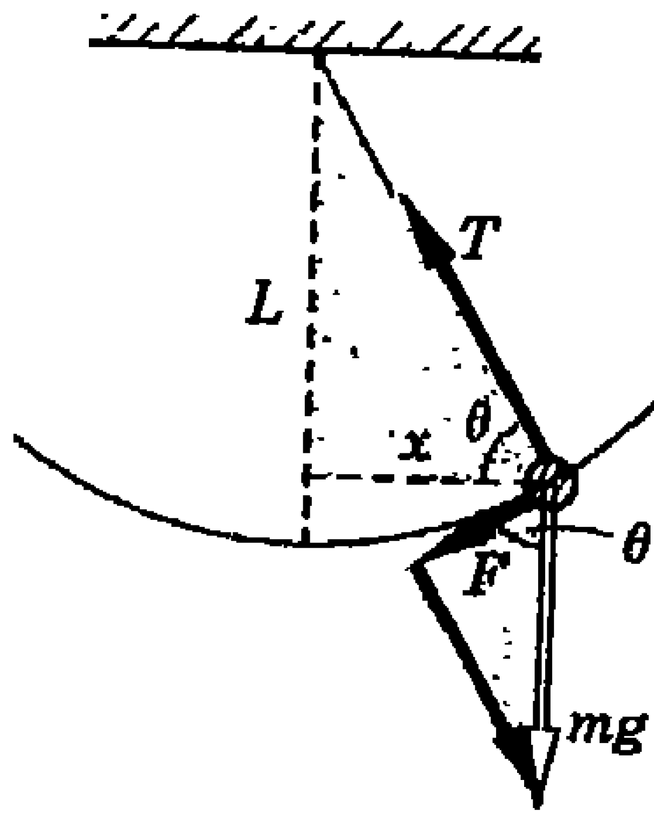
لنبدأ فى حساب الزمن ابتداء من لحظة تحرير الجسم . وهذه هى نهاية المنحنى فى الجهة اليسرى . وسنعتبر أن الزمن عند هذه النقطة هو $t = 0$. وفى لحظة لاحقة اخرى سوف يحتل الجسم الموضع المبين فى الشكل . ومن ثم يمكننا أن نعتبر أن هذا المنحنى يمثل الرسم البيانى لازاحة الجسم y كدالة للزمن وطبقا للمعادلتين (١٣ — ٨) و (١٣ — ٩) ، يمكننا كتابة معادلة هذا المنحنى كالتالى :

$$y = y_0 \cos \omega t = y_0 \cos 2\pi f t = y_0 \cos \frac{2\pi t}{T} \qquad (١٣ - ١٠)$$

ويسمى هذا **المنحنى بالمنحنى الجيبى** ، وتسمى الحركة التى تسببه **الحركة الجيبية** . ومن الواضح أن الحركة التوافقية البسيطة والحركة الجيبية شيء واحد .

١٣ — ٦ البندول البسيط

نعلم أن البندول البسيط المبين فى الشكل ١٣ — ٧ يتحرك حركة توافقية بسيطة . فإذا كانت قوة الاستعادة المؤثرة على الجسم تتناسب مع الازاحة فإن هذا يعنى أن قانون هوك ينطبق على الجسم وأن اهتزازه هو حركة توافقية بسيطة كما رأينا سابقا . سنحاول الآن ايجاد قوة الاستعادة فى حالة البندول البسيط .



شكل (١٣ — ٧)
الزاويتان θ متساويتان . لاحظ أيضا أنه إذا لم يكن ارتجاج البندول كبيرا جدا ، فإن مركبة F فى الاتجاه x (هو الاتجاه x لقوة الاستعادة) تكون قريبة من F ذاتها .

واضح من الشكل أن كرة البندول تتحرك على قوس من دائرة . وحيث أن الشد فى خيط البندول عمودى دائما على هذا القوس ، فإن الشد T لايؤثر على الحركة ، وذلك أن وزن كرة البندول mg هو الذى يسبب الحركة . ومع ذلك فإن مركبة واحدة فقط من مركبتى الوزن ، وهى المركبة المماسية لقوس الدائرة F ، هى التى تسبب الحركة الاهتزازية للبندول . ومن الشكل ١٣ — ٧ نجد أن :

$$F = -mg \cos \theta$$

حيث استخدمت الاشارة السالبة لنبين أن F هى قوة استعادة . ولكن يمكننا أن نرى أيضا من الشكل أن $\cos \theta = x/L$ ، إذن :

$$F = -\frac{mg}{L}x \qquad (١٣ - ١١)$$

هذه المعادلة تشبه قانون هوك :

$$F = -kx$$

باستثناء تفصيل واحد . ففى قانون هوك يجب أن تكون الازاحة فى عكس اتجاه القوة . ونحن نرى من الشكل ١٣ – ٧ أن هذا ليس صحيحا فى هذه الحالة ، لأن F و x ليسا فى نفس الخط تماما . ومع ذلك ، إذا كانت زاوية ارتجاج البندول صغيرة جدا فإن F و x ستكونان فى نفس الخط تقريبا : إذن ، إذا لم يكن ارتجاج البندول واسعا جدا فإن البندول يتبع قانون هوك . وبهذا التقريب سوف يتحرك البندول حركة توافقية بسيطة . وبمقارنة المعادلة (١٣ – ١١) بقانون هوك سنجد أن ثابت الزنبرك k فى حالة البندول هو :

$$k = \frac{mg}{L}$$

وبالتعويض عن قيمة k من المعادلة السابقة فى الصيغة العامة للزمن الدورى لجسم يتحرك حركة توافقية بسيطة ، أى المعادلة (١٣ – ٧) ، نحصل على :

الزمن الدورى للبندول

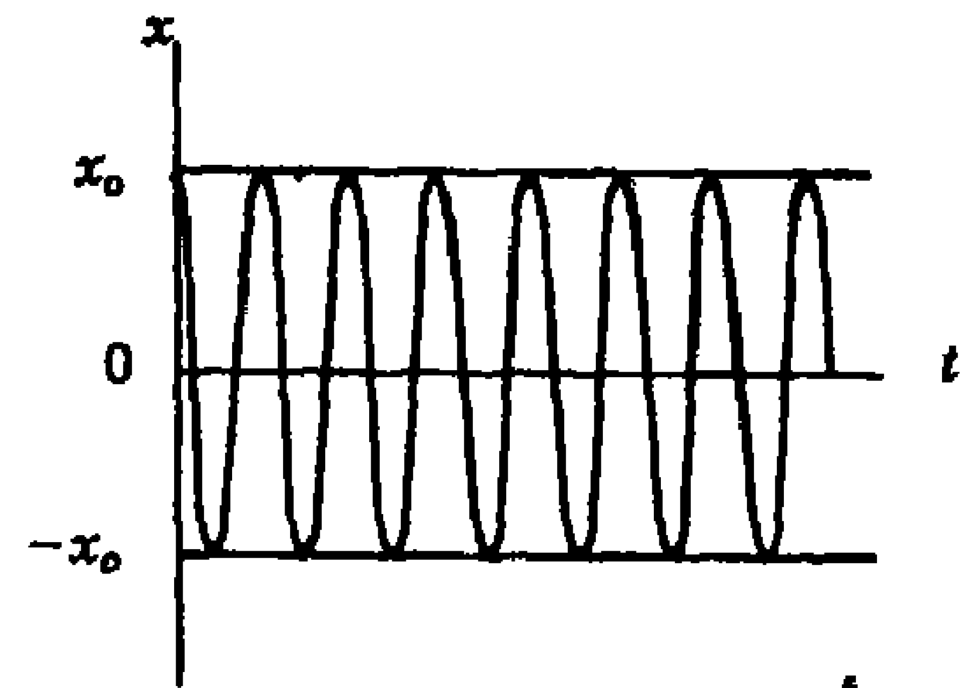
$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (١٣ - ١٢)$$

لاحظ أن الزمن الدورى للبندول البسيط لايعتمد على كتلة ثقل البندول ، ولكنه يعتمد فقط على طول البندول وتسارع الجاذبية g . وعليه ، يمكننا قياس g بدقة كبيرة باستخدام البندول البسيط . فإذا كان طول البندول معلوما وقسنا زمن الاهتزاز يمكننا حساب قيمة g مباشرة من المعادلة (١٣ – ١٢) . ويمكن أن تكون هذه الطريقة لتعيين g دقيقة جدا إذا اتخذت الاحتياطات اللازمة .

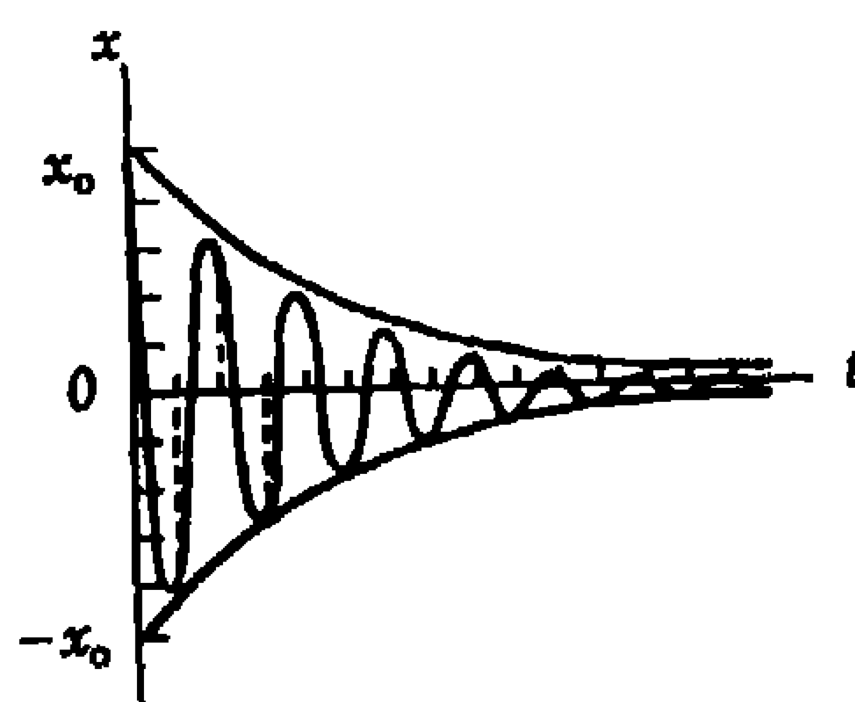
١٣ – ٧ الاهتزازات القسرية

فى أى نظام مهتز حقيقى تفقد دائما بعض الطاقة ضد قوى الاحتكاك . نتيجة لذلك تقل سعة اهتزاز البندول أو الكتلة المثبته فى نهاية الزنبرك باستمرار بمرور الوقت . وهذه الحقيقة موضحة فى الشكل (١٣ – ٨) .

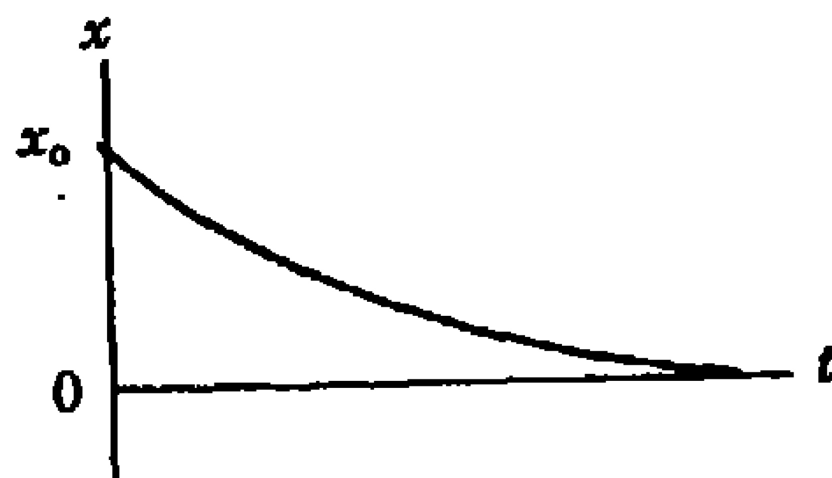
شكل (١٣ – ٨)
يعتمد الاهتزاز الحر لنظام على مقدار الطاقة المفقودة فيه .



(أ) اهتزاز غير متضائل



(ب) اهتزاز ناقص المضاءلة



(ج) اهتزاز زاد المضاءلة .

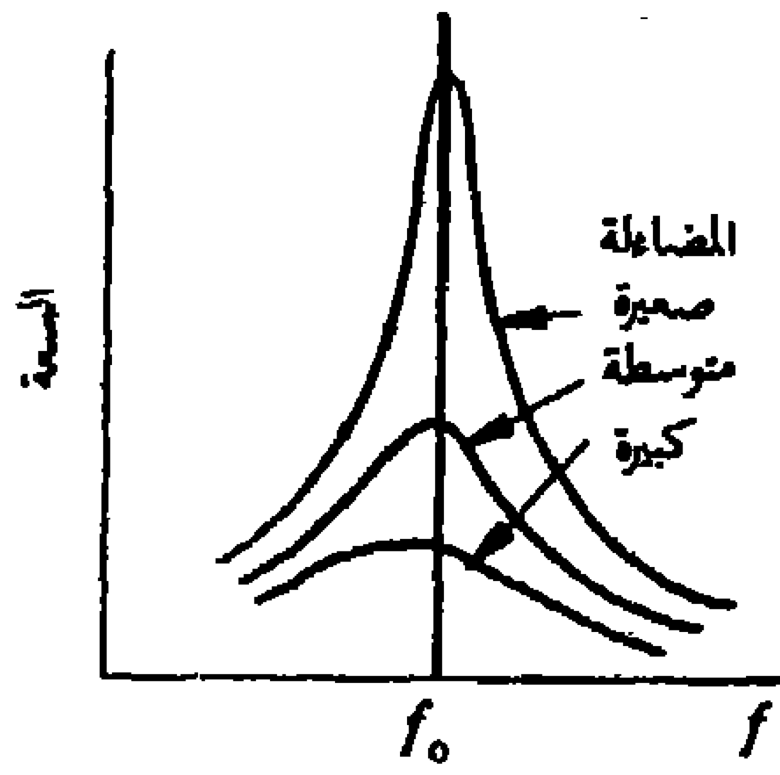
ويمثل الجزء أ الحالة المثالية لاهتزاز نظام لا احتكاكى ، وهذه هى الحالة التى ناقشناها فى الاجزاء السابقة . أما الجزء ب فإنه يمثل حالة اكثر واقعية ، حيث يتأثر الاهتزاز بشدة نتيجة لوجود قوى الاحتكاك . ويقال أن مثل هذا النظام **متضائل** وأن النظام **يتضاءل** بسرعة كبيرة .

وإذا كانت قوى الاحتكاك كبيرة جدا فإن النظام لن يهتز على الاطلاق . وبدلا من ذلك يعود النظام ببساطة إلى موضع توازنه ببطء ، ، كما هو مبين فى الشكل ١٣ — ٨ جـ . وعندئذ يقال أن هذا النظام **زائد المضاءلة** . ويمكن أن يحدث ذلك إذا كانت الكتلة المثبته فى نهاية الزنبرك مغمورة فى سائل لزج جدا . وفى هذه الحالة لن تهتز الكتلة على الاطلاق . وعندما تكون قوى الاحتكاك كبيرة بدرجة كافية لأن تمنع اهتزاز النظام ، يقال عندئذ أن النظام **حرج المضاءلة** .

لكى يهتز النظام الحقيقى لفترة زمنية طويلة لابد أن يزود النظام بالطاقة باستمرار لتعويض الطاقة المفقودة فى بذل شغل الاحتكاك . فمثلا ، لكى تستمر أرجوحة الطفل فى الارتجاج بسعة ثابتة ، لابد أن تدفع الأرجوحة من وقت لآخر لاضافة الطاقة إلى النظام . وهذا حقيقى لجميع الأنظمة المهتزة . إذن لابد من استخدام عامل خارجى لامداد النظام بالطاقة لكى يستمر النظام فى الاهتزاز دون مضاءلة .

ونحن نعلم جميعا أن هناك طريقة صحيحة واخرى خاطئة لدفع الأرجوحة إذا اريد أن ترتفع الأرجوحة عاليا . ذلك أننا يجب أن ندفع الأرجوحة فى اتجاه حركتها وليس عكسها . وبهذه الطريقة فقط يمكن تزويد النظام بطريقة فعالة . وفى الحقيقة ، إذا دفعت الأرجوحة فى عكس اتجاه الحركة فإن الاهتزاز قد يتوقف فى نهاية الأمر لان الجسم المهتز يجب أن يبذل عندئذ شغلا على العامل الدافع وهذه الحقائق البسيطة ذات اهمية كبيرة فى جميع الأنظمة المهتزة اهتزازا **قسريا** .

يستمر النظام المقود عادة فى الاهتزاز بواسطة قوة تكرارية تؤثر على النظام ، وقد يكون تردد هذه القوة f مساويا أو غير مساو للتردد الطبيعى لاهتزاز النظام f_0 . وتصل فعالية العامل الحافز فى امداد النظام بالطاقة إلى أقصاها إذا كان $f_0 = f$.



شكل (١٣ — ٩)
رنين الأنظمة المهتزة نتيجة لقوة حافزة متغيرة التردد .

ولكن تأثيره يكون أقل فاعلية فى امداد النظام بالطاقة عند جميع الترددات الأخرى ، وهذا لأن القوة الحافزة لاتكون دائما متفقة فى الطور مع حركة النظام . ويوضح الشكل ١٣ — ٩ تغير سعة اهتزاز النظام مع تردد القوة الحافزة . لاحظ كما قلنا سابقا ، أن فاعلية القوة الحافزة فى امداد النظام بالطاقة تكون أكبر مايمكن عندما يكون التردد f مساويا للتردد الطبيعى للنظام f_0 . وفى هذه الحالة يقال أن القوة فى حالة **رنين** مع النظام . وسوف نتكلم أكثر من ذلك عن التردد f_0 ، وهو مايسمى **تردد الرنين** للنظام ، فى الفصل التالى عند مناقشة الاهتزاز الرنينى للأوتار .

ملخص

فى الانظمة المهتزة تتحول الطاقة تبادليا من طاقة حركة إلى طاقة وضع . مجموع هاتين الطاقتين ثابت بشرط عدم وجود أى عوامل مبددة للطاقة . الطاقة المختزنة فى زنبرك تساوى $\frac{1}{2}kx^2$ ، حيث k ثابت الزنبرك .

عندما يتعرض نظام إلى قوة الاستعادة المعطاة بقانون هوك فإنه يتحرك حركة توافقية بسيطة (SHM) . فى حالة النظام « زنبرك – كتلة » يعطى تسارع الكتلة بالعلاقة $F = ma$ ويساوى $a = -(k/m)x$. سرعة الكتلة عند أية ازاحة x يمكن أيجادها من معادلة اتزان الطاقة ، أى المعادلة $\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$.

عندما تتحرك كرة على دائرة بسرعة لا اتجاهية ثابتة يتحرك ظلها حركة توافقية بسيطة . يمكننا استخدام حركة الكرة على دائرة الإسناد لحساب الزمن الدورى للحركة التوافقية البسيطة . يعطى الزمن الدورى لاهتزاز كتلة مثبته فى نهاية زنبرك بالمقدار $2\pi\sqrt{m/k}$.

تعتبر حركة البندول البسيط تقريبا للحركة التوافقية البسيطة بشرط أن تكون زاوية ارتجاحه صغيرة . يعطى الزمن الدورى للبندول البسيط بالمقدار $2\pi\sqrt{L/g}$.

تعتمد سعة الحركة التوافقية البسيطة على تردد القوة الحافزة . يحدث الرنين إذا كان تردد القوة الحافزة مساويا للتردد الطبيعى للنظام . عندئذ تكون سعة الأهتزازة أكبر مايمكن .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – توضيح معنى الكلمات الآتية بالنسبة إلى كتلة تهتز فى طرف زنبرك : السعة ، الازاحة ، التردد ، الزمن الدورى .

٢ – شرح العلاقة بين طاقة الحركة وطاقة الوضع والطاقة الكلية لنظام يهتز .

٣ – حساب الطاقة المختزنة فى زنبرك بدلالة ثابت الزنبرك ومقدار امتداده أو انضغاطه .

٤ – استخدام قانون بقاء الطاقة لاثبات العلاقة $\frac{1}{2}kx_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$. استخدام هذه العلاقة لإيجاد سرعة الكتلة المثبته فى طرف زنبرك .

٥ – استخدام القانون $F = ma$ لاثبات أن تسارع الكتلة المثبته فى طرف زنبرك تعطى بالعلاقة $a = -(k/m)x$

٦ – ذكر أهمية قانون هوك بالنسبة إلى الحركة التوافقية البسيطة .

٧ – شرح ارتباط الحركة على دائرة إسناد بالحركة التوافقية البسيطة .

٨ – إيجاد التردد الطبيعى والزمن الدورى لاهتزاز كتلة مثبته فى طرف زنبرك .

٩ – شرح سبب تسمية الحركة التوافقية البسيطة بالحركة الجيبية . كتابة معادلة المنحنى الجيبى وشرح الكميات الموجودة فيه .

١٠ – شرح سبب ظهور قوة الاستعادة فى حالة البندول البسيط ، وشرح لماذا تعتبر حركة البندول حركة توافقية بسيطة تقريبا . كتابة معادلة الزمن الدورى للحركة .

١١ – شرح معنى المصطلحات التالية فيما يتعلق بالاهتزاز القسرى : متضائل ، زائد المضاءلة ، حرج المضاءلة ، رنين . تخطيط رسم بيانى يوضح العلاقة بين سعة الاهتزاز وتردد الاهتزاز المقود (أو القسرى) .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

$$f = 1/\tau$$

السعة

الازاحة

وحدة الهرتز (Hz)

ثابت الزنبرك k

SHM

$PE = \frac{1}{2}kx^2$

دائرة الاسناد

$\tau = 2\pi\sqrt{m/k}$

الحركة الجيبية

$x = x_0 \cos(2\pi ft)$

$\tau = 2\pi\sqrt{L/g}$

مضاءلة حرجة

التردد الطبيعي للرنين

اسئلة وتخمينات

١ – ماهي الشروط الاساسية الواجب توافرها فى النظام اللااحتكاكى لكى يتحرك حركة توافقية بسيطة ؟

٢ – تدحرجت كرة صغيرة (محمل كريات مثلا) فى قصعه خلط كما هو مبين فى الشكل . م١٣ – ١ . اشرح لماذا تحدث الحركة الاهتزازية فى (أ) ولاتحدث فى (ب) . ماذا يسبب ظهور قوة الاستعادة فى (أ) ؟ بماذا يخبرنا قانون بقاء الطاقة عن (أ) إذا كانت قوى الاحتكاك مهملة ؟



(أ)



(ب)

شكل (م ١٣ – ١)

٣ –هل تتحرك الكرة تامة المرونة المرتدة من أرضية صلدة حركة توافقية بسيطة ؟ هل هناك اى تشابه على الاطلاق ؟ اشرح اجابتك .

٤ – هل تتغير الطاقة تبادليا بين طاقه الوضع وطاقه الحركة فى جميع الاجسام المهتزة التى لا تعانى أى فواقد احتكاك ؟ اشرح .

٥ – هناك طريقة شائعة لتحرير السيارة المتعطلة وهى أن تهز هذه السيارة أماما وخلفا مع النقل المناسب للتروس من الامامى إلى الخلفى ثم من الخلفى إلى الامامى مرات عديدة . ناقش الأساس الفيزيائى لهذه الطريقة مع الاهتمام خصوصا بانتقال الطاقة .

٦ – علق ثقلان متساويان سويا فى نهاية زنبرك واحد ثم وضع النظام فى حالة اهتزاز . ماذا يحدث لسعة وتردد والسرعة القصوى لنهاية الزنبرك إذا وقع احد الثقلين (أ) عندما كانت استطالة الزنبرك اقصى ما يمكن ، (ب) عندما كانت الكتلة تمر بالموضع المركزى ؟

٧ – هل تعمل ساعة بندولية مضبوطه عند مستوى سطح البحر بدقه فى مدينة ارتفاعها حوالى ميل عن سطح البحر كمدينة دنفر مثلا ؟

٨ – هناك ترددات مميزة لاهتزاز اجزاء مختلفة من جسم الانسان كالارتجاج الحر للذراع أو الساق مثلا . ناقش كيف تؤثر هذه الترددات الطبيعية على طريقة مشى أو جرى الإنسان . قدر هذه الترددات .

٩ – ناقش تأثير خصائص تصميم لوح القفز اوالترامبولين على ملاءمته للغرض وطريقة عمله .

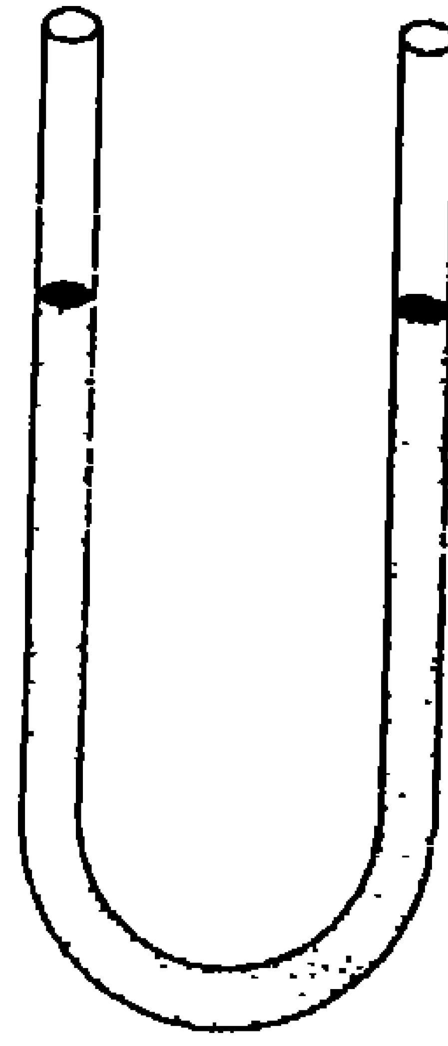
١٠ – عندما تكون عجلات السيارة غير متزنه قد تهتز السيارة بشدة عند سرعة معينه . اشرح لماذا :

١١ – افترض ان ثقل البندول عبارة عن كرة مجوفة . هل تتغير خواص البندول إذا كانت الكرة مملوءة بالماء تماما ؟ أو مملوءة إلى الربع فقط ؟

١٢ – قدر التردد الطبيعي لاهتزاز سيارة إلى أعلى وإلى اسفل على زنبركاتها . تحت أى شروط يصبح هذا التردد الطبيعي هاما ؟ (ق)

١٣ – ثنيت أنبوبة زجاجيه (نصف قطرها الداخلى 1 cm) لتصبح انبوبة على شكل الحرف U طول كل من فرعيها 40 cm وطول قاعها حوالى 10 cm (انظر الشكل م ١٣ – ٢) .

قدر التردد الطبيعى لاهتزاز عمود من السائل فى الانبوبة إلى أعلى وإلى أسفل عندما تكون الأنبوبة U مملوءة إلى ارتفاع قدر 30 cm (أ) بالماء ، (ب) بالزئبق . (ق)



شكل (م ١٣ – ٢)

مسائل :

١ – كما ترى فى الشكل م ١٣ – ٣ ، تهتز كتلة بين النهايتين اللتين ترتفعان عن سطح الأرضية بمقدار 10.0 cm و 24.0 cm ، وتصل الكتلة إلى النقطة 20 مرة فى الدقيقة . ما هو (أ) التردد ، (ب) الزمن الدورى ، (جـ) سعة الحركة الاهتزازية للنظام ؟

٢ – علقت كتلة قدرها 20 g فى نهاية زنبرك رأسى ، وعندما اضيفت اليها كتلة قدرها 30 g زاد امتداد الزنبرك بمقدار 15.0 cm . (أ) ماهو ثابت الزنبرك لهذا النظام ؟ (ب) ماهو الزمن الدورى الطبيعى بعد اضافة الكتلة 30 g ؟

٣ – علقت كتلة قدرها 2.0 g فى طرف سلك رأسى مصنوع من الصلب طوله 15.0 cm ومساحة مقطعه 8.0×10^{-3} cm^{-2} . (أ) مامقدار استطالة السلك تحت تأثير هذا الحمل ؟ (ب) ماهو التردد الطبيعى للاهتزاز الرأسى للكتلة المعلقة فى طرف السلك ؟ (معامل يونغ للسلك 19×10^{10} N/m^2) .

٤ – لاحظ طفلان أن بإمكانهما هز سيارة إلى أعلى وإلى أسفل بدفعها دوريا إلى أسفل ، وكانت السيارة تهتز ثمانى دورات كاملة فى زمن قدره 13.0 s (أ) بفرض أن كتلة السيارة 1800 kg ،أوجد ثابت الزنبرك لنظام التعليق ، (ب) إذا كانت هذه القيمة صحيحة ، ماهى المسافة التى تخفضها السيارة بالتقريب إذا دخل شخص فى السيارة وجلس فى مقعدها الأمامى ؟

٥ – يستطيل زنبرك معين يتبع قانون هوك بمقدار 20 cm تحت تأثير حمل وزنه 0.35 N . ماهو مقدار الطاقة المختزنة فى الزنبرك عندما ينضغط بمقدار 5.0 cm ؟

٦ – علق جسم وزنه 4.0 lb فى طرف زنبرك (k=3.0 lb/in) فاستطال الزنبرك بمقدار 2 in من موضع اتزانه ثم ترك حرا . أوجد (أ) سرعة الثقل عندما يمر بموضع التوازن ، (ب) تسارعه فى لحظة إطلاقه حرا مباشرة .

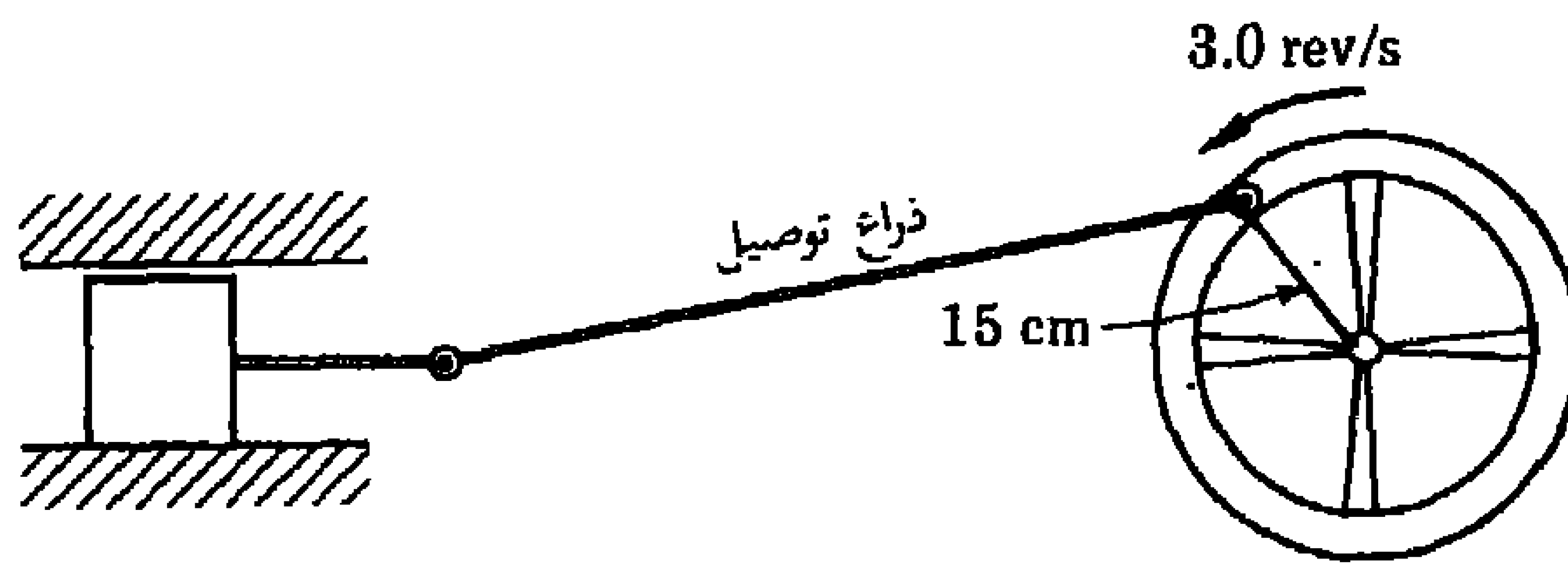
٧ – علقت كتلة قدرها 200 g فى طرف زنبرك (k=0.60 N/m) ثم جذبت إلى أسفل مسافة قدرها 3.0 cm من موضع التوازن ثم اطلقت . ماهو (أ) التسارع الابتدائى للكتلة ، (ب) سرعتها عند مرورها بموضع التوازن ؟

٨ – ينزلق نظام « كتلة – زنبرك » على سطح أفقى لا احتكاكى (كما فى الشكل ١٣ – ٣) وكانت قيمة الكتلة 50 g . وعندما طبقت قوة افقية قدرها 0.70 N على النظام استطال الزنبرك بمقدار 4.0 cm . (أ) ماهو تسارع الكتلة فى لحظة إطلاق النظام حرا ؟ (ب) ماهى سرعة الكتلة عند مرورها بموضع التوازن ؟

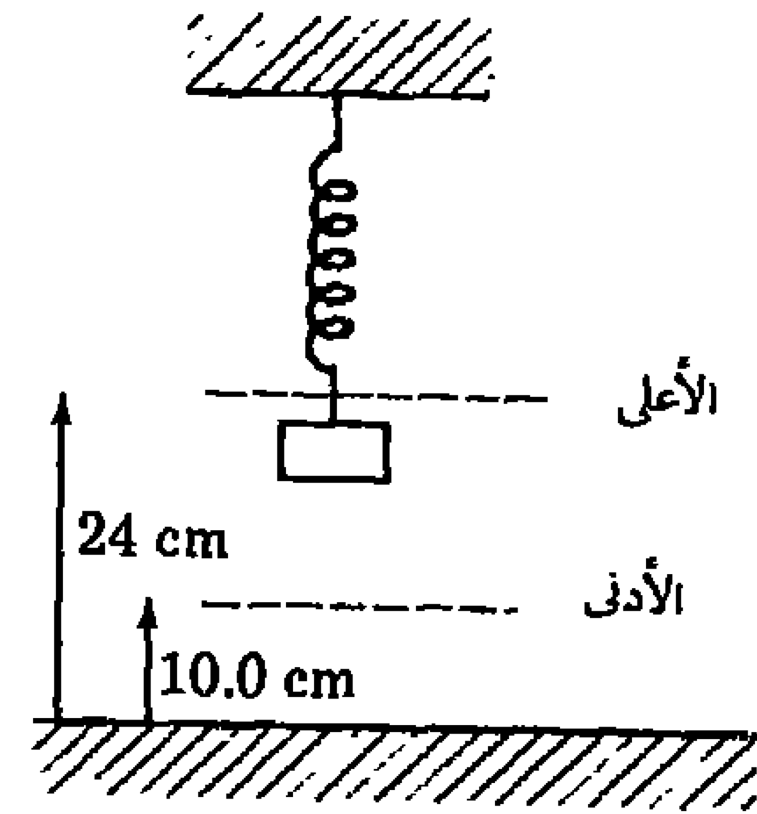
٩ – ترى فى الشكل م ١٣ – ٤ عجلة دوارة تقوم بتشغيل كباس . أوجد الكميات الآتية التى تصف حركة الكباس الموضح بالشكل : (أ) التردد ، (ب) السعة ، (جـ) السرعة القصوى ، (د) السرعة عندما يكون ذراع التوصيل أفقيا .

١٠ – اكتب معادلة حركة الكباس المبين فى الشكل م١٣ – ٤ فى الصورة $x = x_0 \cos \omega t$ باستخدام القيمتين العدديتين للمقدارين x_0 و ω .

١١* – اوجد مقدار تسارع الكباس المبين فى الشكل م ١٣ – ٤ (أ) عندما تكون ذراع التوصيل أفقية ، (ب) عندما يكون نصف القطر الموصل بين مركز العجلة ونقطة الدوران رأسيا ، (جـ) عندما يصنع القطر الموصل بين مركز العجلة ونقطة الدوران زاوية قدرها θ مع الرأسى .



شكل (م١٣ – ٤)



شكل (م١٣ – ٣)

١٢ – تتذبذب كتلة قدرها 2.0 kg فى حركة توافقية بسيطة فى نهاية زنبرك وكانت سعة الحركة 30 cm وثابت الزنبرك 400 N/m . أوجد سرعة الكتلة عندما تكون ازاحتها (أ) 30 cm ، (ب) 0 cm ، (جـ) 15 cm .

١٣** – يتحرك كباس حركة توافقية بسيطة سعتها 8.0 cm وترددها f . وتستقر حلقة (وردة) حرة على السطح العلوى للكباس . وقد لوحظ أن الحلقة تتحرك مع الكباس إلى أعلى وإلى أسفل عندالترددات المنخفضة للكباس .أما عند الترددات العالية جدا فإن الحلقة تطفو فوق الكباس عندما يبدأ فى الحركة إلى أسفل . (أ) ماهو اقصى تسارع للكباس عندما تبدأ الحلقة فى الانفصال عنه ؟ (ب) ماهو أقل تردد يحدث عنده هذا الانفصال ؟

١٤ – بندول بسيط زمنه الدورى 1.000 s . (أ) ماطول هذا البندول ؟ (ب) إذا كان ثقل البندول عبارة عن كرة . من أين يقاس الطول ، من قمة الكرة أم من مركزها ؟

١٥ – بندول بسيط طوله 6.0 in . (أ) بأى تردد يهتز البندول ؟ (ب) إذا اطلق البندول حرا عندما كان يصنع زاوية قدرها 37° مع الرأسى ، ماهى سرعة ثقل البندول عندما يمر بالنقطة المركزية ؟

١٦ – ساعة حائط ذات بندول أخذت إلى القمر حيث تزن الاجسام حوالى سدس وزنها على الأرض . ماهو الزمن اللازم لكى تقرأ ساعة واحدة على تدريجها ؟

١٧ – حبل غسيل مثبت من طرفيه فى قائمين كبيرين . وعندما علق ثقل قدره 2 lb من النقطة المركزية للخط ارتخى بمقدار 3.0 in . وعندما استبدل بهذا الثقل ثقل آخر مقداره 4.0 lb ارتخى الخط بمقدار 6.0 in . فإذا علق الثقل 2 lb عليه وجذب إلى أسفل مسافة اضافية قدرها 2.0 in أوجد (أ) تردد الاهتزازة ، (ب) سرعة الجسم عند مروره بنقطة التوازن .

١٨ – ثبتت كتلة قدرها m موضوعه على منضدة لا احتكاكية فى طرفى زنبركين كما هو موضح فى الشكل م ١٣ – ٥ . اثبت أن تردد اهتزاز هذا الجهاز هو :

$$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{d}}$$

حيث d مقدار استطالة كل من الزنبركين تحت تأثر وزن الكتلة m .

١٩** – وضع زنبرك ثابته 15N /m رأسيا فى انبوبة ثم وضعت على نهايته العليا كتلة قدرها 20 g وتركت حتى وصلت إلى السكون . سنعتبر أن هذا الموضع هو الموضع الصفرى . وبعد ذلك دفعت هذه الكتلة مسافة قدرها 10.0cm فى الأنبوبة إلى أسفل باستخدام رافعة . الى أى ارتفاع فوق الموضع الصفرى سوف تصل الكتلة عندما يترك الزنبرك حرا ؟ (ساو طاقة الوضع المختزنه فى الزنبرك بطاقه حركة الكتلة . ماذا يعنى ذلك بالنسبة للزنبرك ؟) .

٢٠* – غمر زنبرك منضغط بالكتلة المثبته فى طرفه فى وعاء يحتوى على ماء فى درجة 20.00°C وكانت السعه الحرارية للوعاء والزنبرك والكتله والماء $60\ cal°C^{-1}$. وعندما ترك الزنبرك حرا اهتز ذهابا وايابا فى الماء ولوحظ أن السعة تتناقص باستمرار نتيجة لقوى الاحتكاك (أو قوى اللزوجة) التى يسببها الماء . وعندما توقف الزنبرك عن الاهتزاز وجد أن درجة الحرارة 20.10°C . (أ) ماهى كمية الطاقه التى كانت مختزنه فى الزنبرك ؟ (ب) وإذا كان مقدار انضغاط الزنبرك فى البداية هو 8.0 cm فما هو ثابت الزنبرك ؟

٢١ – اثبت أن السرعة القصوى لثقل البندول تعطى بالعلاقة :

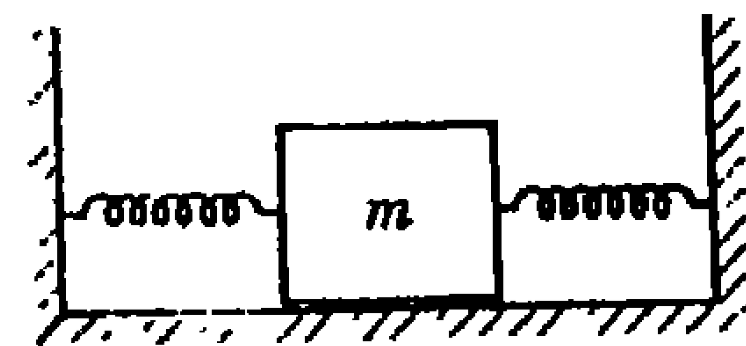
$$v = \sqrt{2gL(1 - \cos\theta)}$$

إذا كان البندول يبدأ فى الارتجاج من زاوية قدرها θ مع الرأسى .

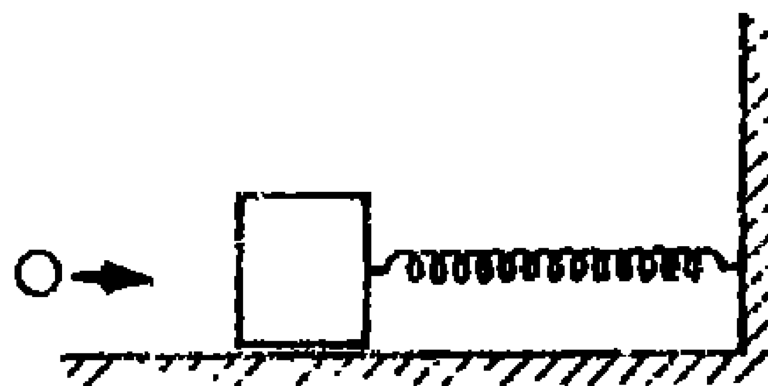
٢٢* – أزيح بندول بزاوية معينة ثم ترك حرا . وعندما مر ثقل البندول بالنقطة المركزية كان الشد فى الخيط ضعف وزن ثقل البندول . اثبت أن الازاحة الزاوية الابتدائية هى 60° .

٢٣* – أطلقت رصاصة كتلتها 10 g بسرعة قدرها 100 cm/s فى قالب كتلته 90 g مثبت فى طرف زنبرك ثابته 100 N/m كما هو مبين فى الشكل فاستقرت فى القالب . فإذا كان القالب ساكنا فى البداية ، فما هى سعة اهتزاز الزنبرك بعد التصادم ؟ اهمل قوى الاحتكاك بين القالب والمنضدة .

٢٤* – تهتز كتلة قدرها 2.0 kg مثبته فى نهاية زنبرك طبقا للعلاقة $y = 0.20\cos(9.42t)$ ، حيث y مقاسة بالسنتيمترات . أوجد (أ) سعة الأهتزاز ، (ب) تردد الأهتزاز ، (جـ) ثابت الزنبرك ، (د) أقصى سرعة للكتلة .



شكل (م١٣ – ٥)


شكل (م١٣ – ٦)

الفصـــل الرابــع عشــر

الحركة الموجية

تستطيع الأجسام المهتزة التى ناقشناها فى الفصل السابق توليد الموجات . وسواء كانت هذه الموجات فى الهواء أو المعدن أو حتى الفراغ ، فإن هناك سمات مشتركة كثيرة بينها جميعا . وسوف نناقش فى هذا الفصل المبادىء الاساسية للحركة الموجية عامة . وستخصص بعض الفصول اللاحقة لتطبيق هذه المبادىء على الصوت والضوء وأنواع اخرى من الموجات .

١٤ - ١ اهمية الحركة الموجية

تصدر الموجات من جميع الاجسام المهتزة تقريبا . وكلنا نعلم جيدا أن النغمات الموسيقية التى نستمع اليها من البيانو أو الكمان ماهى الا موجات تصدر نتيجة لاهتزاز أوتار مشدودة وتصل الينا خلال الهواء . والكلارينت أيضا يبث الموجات الصوتية فى الهواء ، ولكن مصدر الاهتزاز فى هذه الحالة هو لسان المزمار الذى ينفخ فيه العازف . أما فى البوق فإن الموجات تنشأ نتيجة لاهتزاز شفتى عازف البوق عند فم الآلة الموسيقية . وهناك مصادر كثيرة اخرى للأصوات الموسيقية كالطلبة والمثلث والصنجين ، ولكن كلا من هذه المصادر يتكون اساسا من جسم مهتز يقوم بتوليد الموجات فى الهواء .

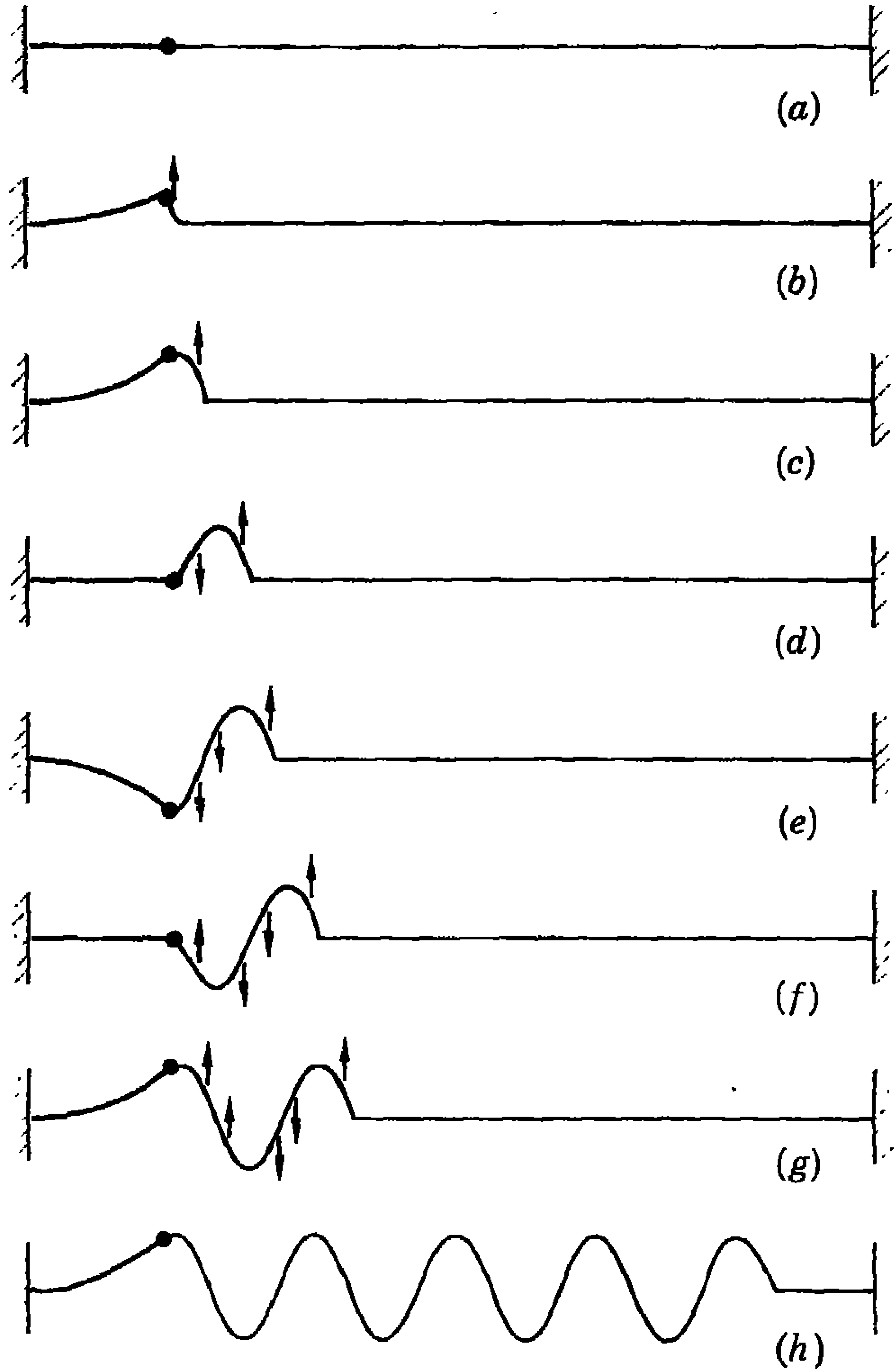
هل فكرت ولو مرة واحدة اثناء مشاهدتك للتليفزيون أن كل ماتراه وتسمعه قد وصل اليك من محطة الارسال بواسطة موجات ؟ هذه الموجات عبارة عن موجات كهربائية مغنطيسية تتولد فى المحطة نتيجة لاهتزاز الشحنات الكهربائية فى الهوائى ، وتنتقل هذه الموجات فى الهواء لتصل إلى جهاز التليفزيون الذى يستجيب لها ثم يحولها إلى موجات ضوئية وصوتية تنتقل اليك عبر الغرفة .

وإذا اصبت بكسر فى احدى عظام جسمك فإن من المؤكد تقريبا أن الطبيب سوف يستخدم الاشعة السينية ، وهى نوع آخر من الموجات ، لتحديد طبيعة الكسر . وإذا لم يظهر الكسر فى الصورة المأخوذة بالاشعة السينية ، قد يقترح الطبيب علاج عضلاتك المجهدة بنوع آخر من الحركة الموجية ، وهى الحرارة أو الاشعة تحت الحمراء .

وهناك أنواع كثيرة اخرى من الموجات المألوفة لنا ، ومع ذلك فهناك ظواهر موجية اخرى غير ملحوظة . فمثلا ، سوف نرى فى الفصل السادس والعشرين أن الخواص الموجية ليست مقصورة على الموجات فقط ، بل تمتد إلى الأجسام المادية مثل كرة البيسبول التى قد تظهر بعض الخواص الموجية .

وفى هذا الفصل سوف نتعرف على القواعد العامة المتعلقة بسلوك الموجات ، وسوف نرى أن جميع الموجات الميكانيكية يمكن تقسيمها إلى نوعين عامين يضم كل منهما عددا كبيرا من الموجات ذات الأشكال المختلفة . ونظرا لأهمية الموجات فإن جزءا كبيرا من علم الفيزياء مخصص لدراسة سلوكها .

شكل (١٤ — ١)
يرسل القضيب المهتز موجة تنتقل فى الوتر المرن . وحيث أن حركة الكرة هى حركة توافقية بسيطة ، فإن الموجة التى تنتقل على الوتر هى موجة جيبية .



١٤ — ٢ الموجات عبر الأوتار : الموجات المستعرضة

لنفرض أننا ربطنا أحد طرفى وتر أو خيط فى حائط وربطنا طرفه الآخر فى طرف قضيب من الصلب بحيث كان الوتر مشدودا كما هو مبين فى الشكل ١٤ — ١ . فإذا طرق طرف قضيب الصلب المرن من اسفل لاكسابه سرعة إلى أعلى كما هو مبين فى الجزء (ب) من الشكل ، فإن طرف القضيب سوف يهتز ذهابا وايابا ، كما هو موضح فى الأجزاء المتتالية من الشكل ١٤ — ١ . ونحن نفترض أن طرف القضيب يتحرك اساسا حركة توافقية بسيطة .

يلاحظ فى الجزء ب أن الخيط يندفع إلى أعلى مع طرف القضيب . كما يلاحظ أيضا أن السرعات فى مختلف النقط على الخيط تتخذ اتجاه الاسهم الموضحة . نرى

من هذا أن ذلك الجزء من الخيط القريب من طرف القضيب يقوم بجذب الجزء الأيمن المجاور له إلى أعلى . وعندما يبدأ ذلك الجزء فى الاستجابة إلى هذا الجذب فإنه بدوره يجذب الجزء المجاور له إلى أعلى ، وهكذا . وبتتبع اجزاء الشكل من جـ إلى ز ، سنرى أن الاضطراب يتحرك باستمرار إلى اليمين . لنفرض أن السرعة التى يتحرك بها الاضطراب على الوتر هى v ، وسوف نرى مؤخرا فى هذا الجزء أن قيمة هذه السرعة تعتمد على كتلة الوتر والشد فيه .

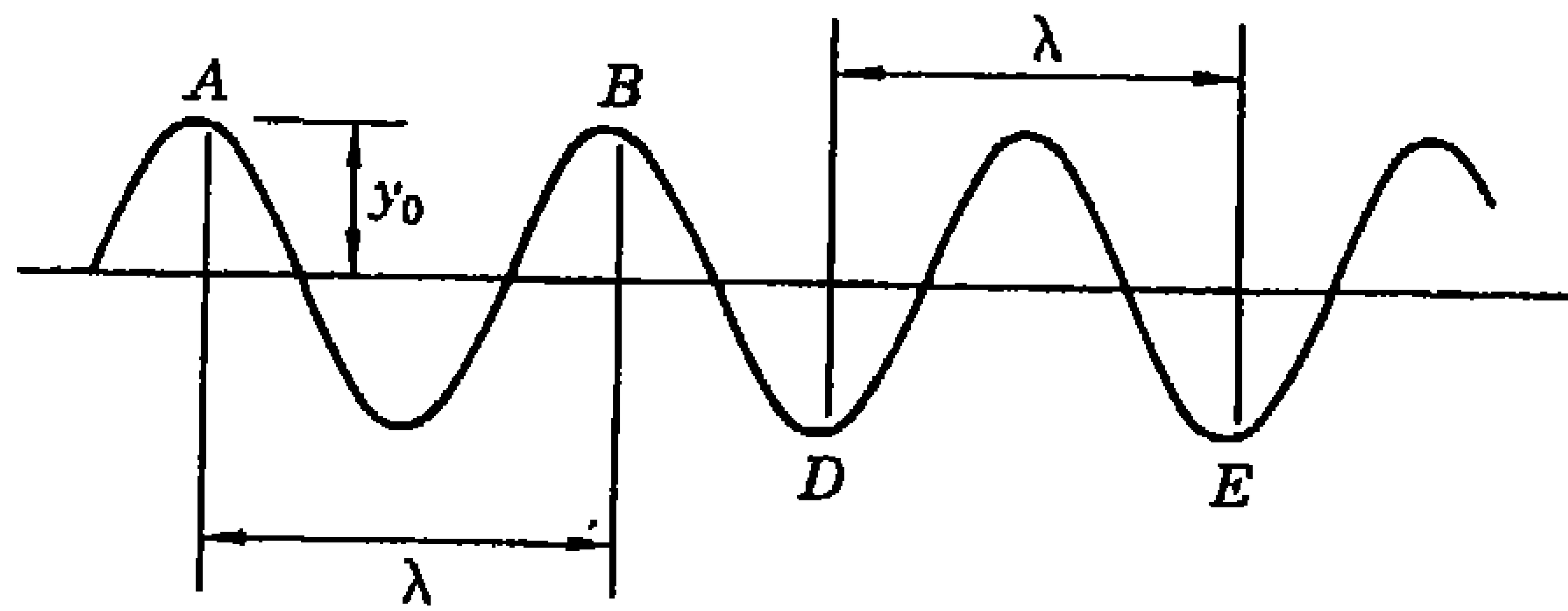
وبينما يستمر الاضطراب الابتدائى فى الانتقال على الوتر إلى اليمين للأسباب التى ناقشناها سابقا ، يستمر القضيب فى الاهتزاز ويصدر أثناء ذلك اضطرابا يتغير باستمرار ويسير بدوره على الوتر إلى اليمين ، كما هو موضح فى الشكل ١٤ — ١ . وحيث أن المصدر يهتز بحركة توافقية بسيطة ، فإن الموجة المتحركة على الوتر ذات شكل جيبى .

تعريف

وسوف يلاحظ أن الموجة فقط هى التى تتحرك إلى اليمين فى الشكل ١٤ — ١ ، بينما تتحرك الاجزاء الصغيرة من الوتر ببساطة إلى أعلى وإلى أسفل . **وتسمى مثل هذه الموجة التى تنتقل فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة الجسيمات بالموجة المستعرضة .**

وقد يسأل المرء : إذا كانت الجسيمات لاتنتقل فى الوتر من اليسار إلى اليمين فماذا يتحرك فى اتجاه انتشار الموجة ؟ من الخصائص المميزة للموجات أنها تحمل الطاقة . وفى هذه الحالة المحددة لم يكن للوتر أية طاقة حركة أو طاقة وضع فى البداية ، ومع ذلك فإن من الواضح أن طاقة الحركة موجودة فى تلك الأجزاء من الموجة التى يتحرك فيها الوتر بسرعة . وهذه الطاقة ، وكذلك طاقة الوضع قد انتقلت من القضيب المهتز إلى الوتر ثم انتقلت فيه من اليسار إلى اليمين . ومن ثم فإن الطاقة تنتقل مع الموجة فى اتجاه انتشارها بسرعة تساوى سرعة الموجة v .

يمكن فهم المصطلحات المستخدمة عند الحديث عن الموجات بسهولة بالرجوع إلى الشكل ١٤ — ٢ .



شكل (١٤ — ٢)
سعة الموجة هى y_0 وطولها الموجى λ .

تسمى النقطتان A و B على الموجة **قمتين** للموجة ، بينما تسمى النقطتان D و E **قرارين** . والدورة الكاملة الواحدة ، أى ذلك الجزء من الموجة الذى تولده دورة كاملة واحدة من المصدر المهتز ، هى المسافة بين قمتين متتاليتين ، أى من A إلى B ، أو المسافة بين قرارين متتاليين ، أى من D إلى E . وتسمى المسافة الأفقية بين أى قمتين متتاليتين أو أى قرارين متتاليين **بالطول الموجى** للموجة ويمثل بالحرف اليونانى لامدا (λ) . وبالطبع y_0 هى سعة الموجة .

هناك علاقة هامة بين الطول الموجى λ وسرعة الموجة v والتردد f لأى موجة ، وتنطبق هذه العلاقة على جميع الموجات ، وسوف نستعين بالشكل ١٤ – ٣ لايجاد هذه العلاقة . لاحظ أن الموجات تنتقل على الوتر بسرعة قدرها v بينما يستمر المصدر فى اصدار موجة اضافية . ويحتاج المصدر لزمن قدره τ وهو الزمن الدورى للاهتزاز ، لكى يرسل المصدر طولا موجيا كاملا على الوتر . وخلال ذلك الزمن تكون الموجات قد تحركت مسافة قدرها λ . إذن ، معادلة الحركة $x = \bar{v}t$ تتحول فى هذه الحالة إلى الصورة :

$$\lambda = v\tau$$

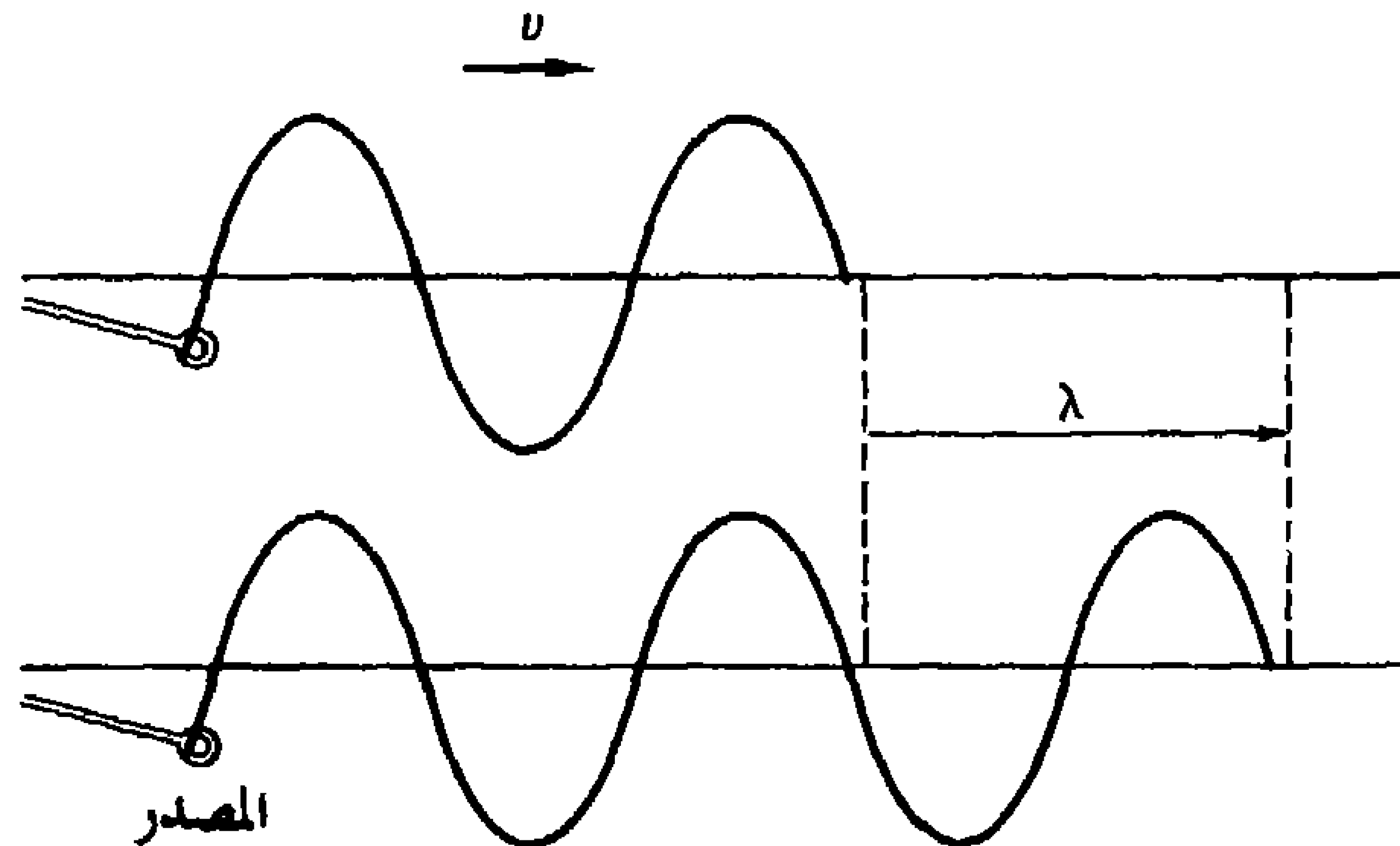
بالتعويض عن τ بالكمية $1/f$ فى المعادلة السابقة نجد أن :

علاقة اساسية للموجات

$$\lambda = \frac{v}{f} \qquad (١٤ - ١)$$

وهذه العلاقة الهامة جدا صحيحة لجميع الموجات ، وسوف نستخدمها كثيرا فيما بعد .

تعطى سرعة الموجة على الوتر بعلاقة بسيطة إلى حد كبير . وسوف نذكر هذه العلاقة هنا بدون اثبات . إذا كان T هو الشد فى الوتر وكانت m كتلة جزء من الوتر طوله L فإن سرعة الموجة على الوتر تعطى بالعلاقة :



شكل (١٤ – ٣)
بينما يصدر المصدر موجة كاملة تكون الموجة قد تحركت مسافة قدرها λ على الوتر . إذن ، تقطع الموجة مسافة قدرها λ فى خلال الزمن τ

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \qquad (١٤ - ٢)$$

مثال توضيحى ١٤ - ١ : وتر جيتار كتلته 2.0 g وطوله 60 cm . ماهو الشد اللازم للوتر لكى تكون سرعة الموجة عليه 300 m/s ؟

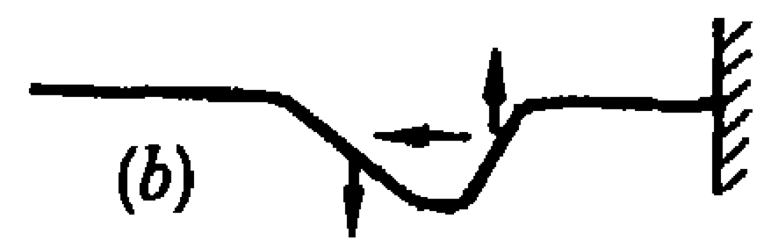
طريقة الحل . بالتعويض فى المعادلة (١٤ - ٢) عن $v = 300$ m/s ، $L = 0.6$ m ، $m = 0.0020$ kg ، نجد أن $T = 300$ N . لاحظ أن هذا الشد كبير جدا فى الواقع ، إذ أنه يكافىء وزن كتلة قدرها 30 kg تقريبا معلقة فى الوتر .

١٤ - ٣ انعكاس الموجة

لم نتكلم حتى الآن عما يحدث للموجة عند اصطدامها بالحائط الصلب الموجود على اليمين . وحيث ان الموجة عبارة عن طاقة متحركة إلى اليمين ، فإنها أما أن تمتص بواسطة الحائط ، أو تنعكس إلى الخلف . وعمليا سوف تمتص بعض الطاقة بواسطة الحائط . ومع ذلك ، فإن الجزء الأكبر من الطاقة سوف ينعكس إذا كان الحائط صلبا جدا (أو إذا كان الطرف الأيمن للوتر حرا تماما*) . بناء على ذلك سوف تتحرك موجة منعكسة على الوتر إلى اليسار أثناء حركة الموجة الاصلية إلى اليمين . وللتبسيط سنفترض عدم فقدان أية طاقة عند الانعكاس .

لدراسة هذه الظاهرة اعتبر قمة موجة واحدة تنتقل على الوتر ، كما هو مبين فى الشكل ١٤ - ٤ أ . عندما تصل هذه الموجة إلى الحائط فإنها لن تستطيع جذب الحائط إلى أعلى بنفس الطريقة التى تجذب بها الموجة جزءا آخر من الوتر إلى أعلى إذا كان موجودا . وحيث أن الحائط لا « يستسلم » فإن القوة فى هذه النقطة ستكون عندئذ أكبر منها فى حالة ما إذا لم ينته الوتر عند هذه النقطة . لذلك فإن الحائط سوف يؤثر على الوتر بجذبه إلى أسفل . وهذا الجذب يؤدى بالتالى إلى تسارع الوتر إلى أسفل بحيث تسبب كمية تحركه انخفاضه تحت الخط الصفرى. نتيجة لذلك تنقلب النبضة رأسا على عقب عند اصطدامها بالحائط ، ولذلك فإن الموجة المنعكسة تبدو كما هو مبين فى الجزء ب من الشكل ١٤ - ٤ . وإذا كان الوتر حرا تماما فى أن يتحرك إلى أعلى وإلى أسفل عند هذا الطرف ، فإن الموجة لم تكن لتنقلب ، بالرغم من أنها سوف تنعكس أيضا (لأن طاقة الموجة لايمكن أن تختفى ببساطة عند هذا الطرف من الوتر !) . تلخيصا لذلك يمكننا أن نقول أن





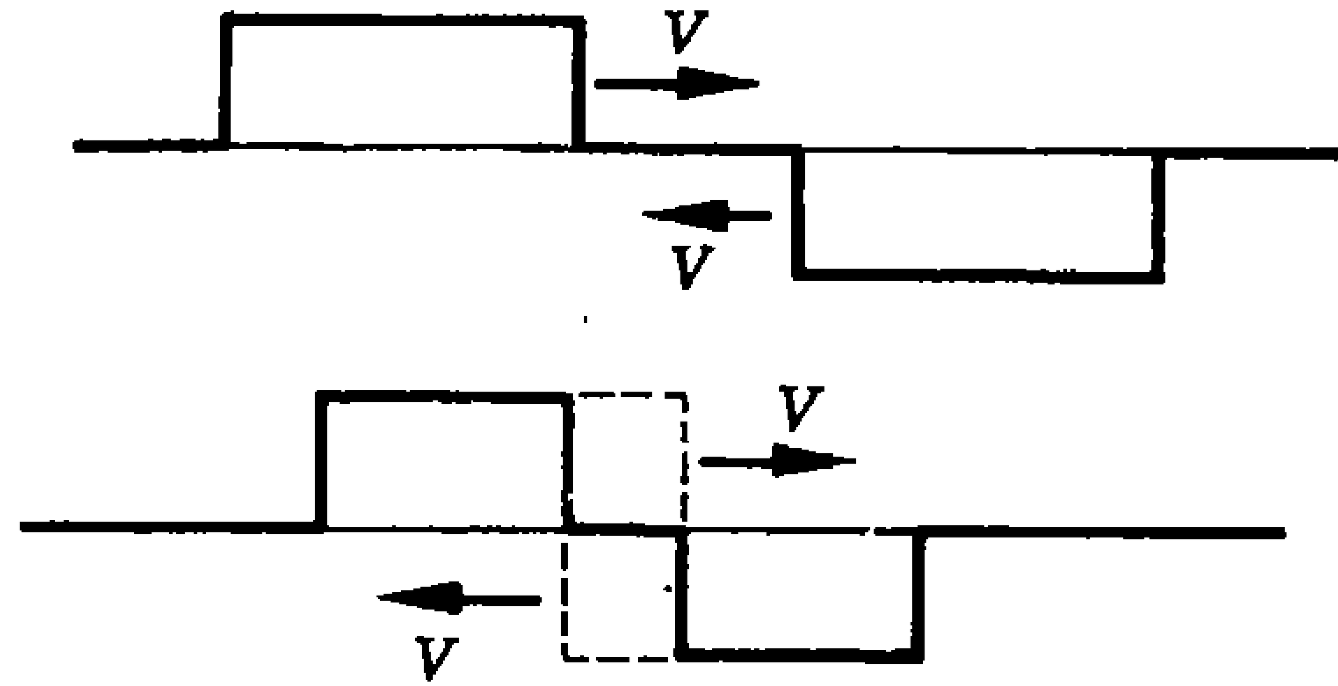
شكل (١٤ - ٤)
تنقلب النبضة الموجية المتحركة على وتر عند انعكاسها من النهاية الثابته .

---

* لايمكن أن يبذل أى شغل عند النهاية الثابتة ، لأن المسافة المقطوعة فى اتجاه القوة المؤثرة تساوى صفرا . لماذا لايحدث فقدان للطاقة ، أى لماذا لايبذل أى شغل ، عند الطرف الحر تماما ؟

النبضة الموجية تنقلب بالانعكاس عند النهاية الثابتة . ولكنها تنعكس دون انقلاب عند النهاية الحرة .

لنعتبر الآن مايحدث عند التقاء نبضة موجية منعكسة تتحرك على وتر إلى الخلف مع نبضة ثانية متحركة على نفس الوتر إلى الأمام . لنفرض أن نبضتين مستطيلتين متحركتين فى اتجاهين متعاكسين قد التقيتا فى موضع معين على الوتر كما هو مبين فى الشكل ١٤ — ٥ ، حيث تمثل الموجتان الأصليتان بالخطوط المتقطعة فى منطقة التراكب . وقد وجد بالخبرة أن إزاحة الوتر فى هذه المنطقة تمثل بالخط المستمر . ذلك أن الإزاحة المحصلة للوتر هى المجموع الاتجاهى للإزاحتين المنفصلتين . وهذا صحيح لجميع الأنظمة الموجية طالما كانت الإزاحة دالة خطية للقوة التى تسببها . وعندئذ يقال أن **مبدأ التراكب** ينطبق على هاتين الموجتين . ويلاحظ أن جميع الموجات التى سنتعامل معها فى هذا الكتاب تتبع **مبدأ التراكب** :



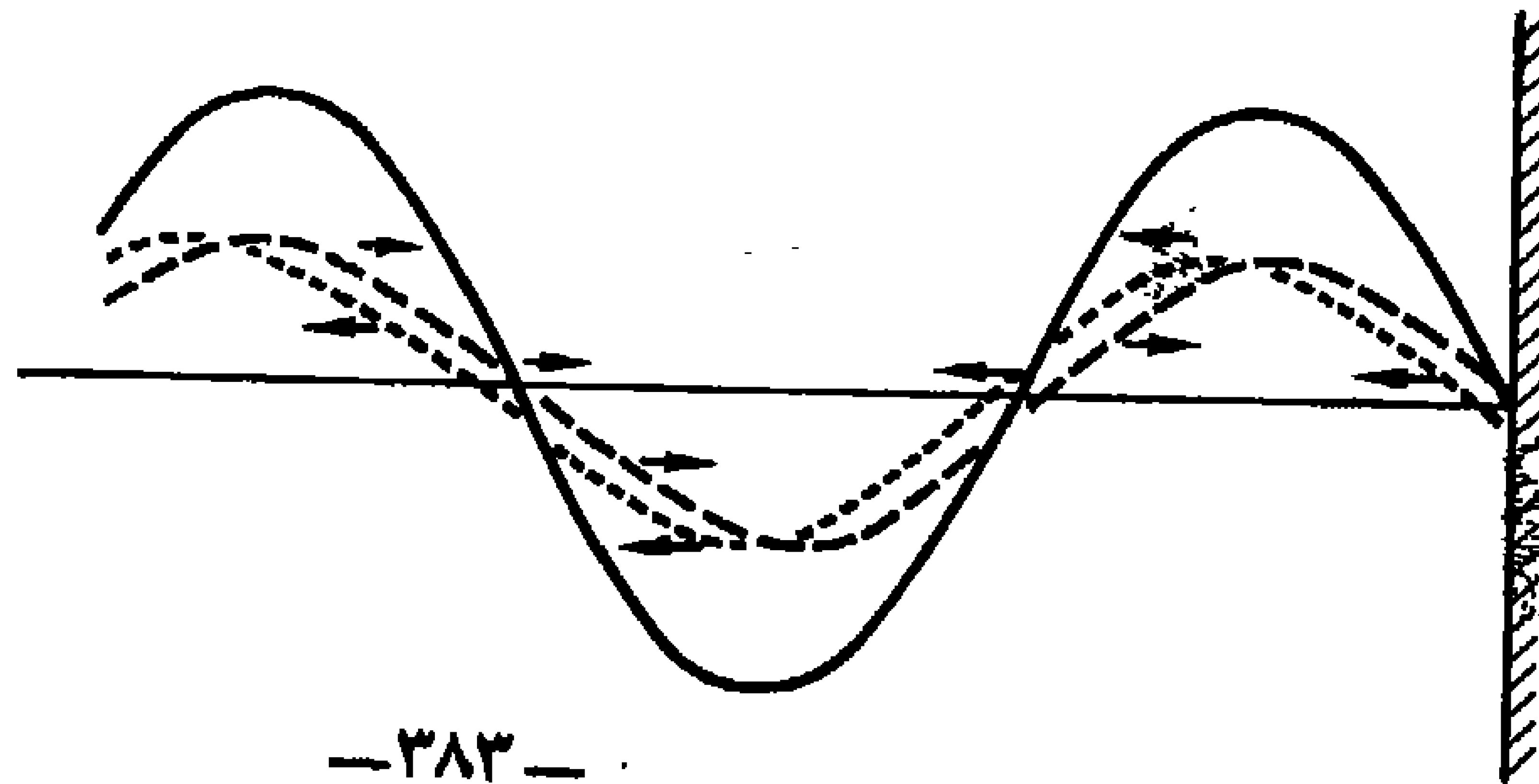
شكل (١٤ — ٥)
طبقا لمبدأ التراكب ، تجمع الموجتان اللتان تنتقلان على نفس الوتر بالطريقة المبينة عند التقائهما سويا

مبدأ التراكب

إذا وقعت نقطة تحت تأثير موجتين فى نفس الوقت فإن إزاحتها تساوى المجموع الجبرى للاضطرابين المنفردين .

نحن الآن مستعدون لكى نرى مايحدث عند انعكاس موجة جيبية متحركة على وتر ، وسيكون لزاما عليك هنا أن تستخدم خيالك إلى حد ما لأننا سوف نرسم صورتى موجتين على نفس الوتر . وللحصول على السلوك الحقيقى للوتر يجب علينا أن نجمع هاتين الموجتين اللتين تمثلان إزاحتى جزيئات الوتر .

تمثل الموجتان اللتان تسيران على الوتر إلى اليمين وإلى اليسار فى الشكل ١٤ — ٦ بالمنحنيين المنقطين . ويمكن الحصول على الإزاحة المحصلة للوتر بجمع هذين المنحنيين



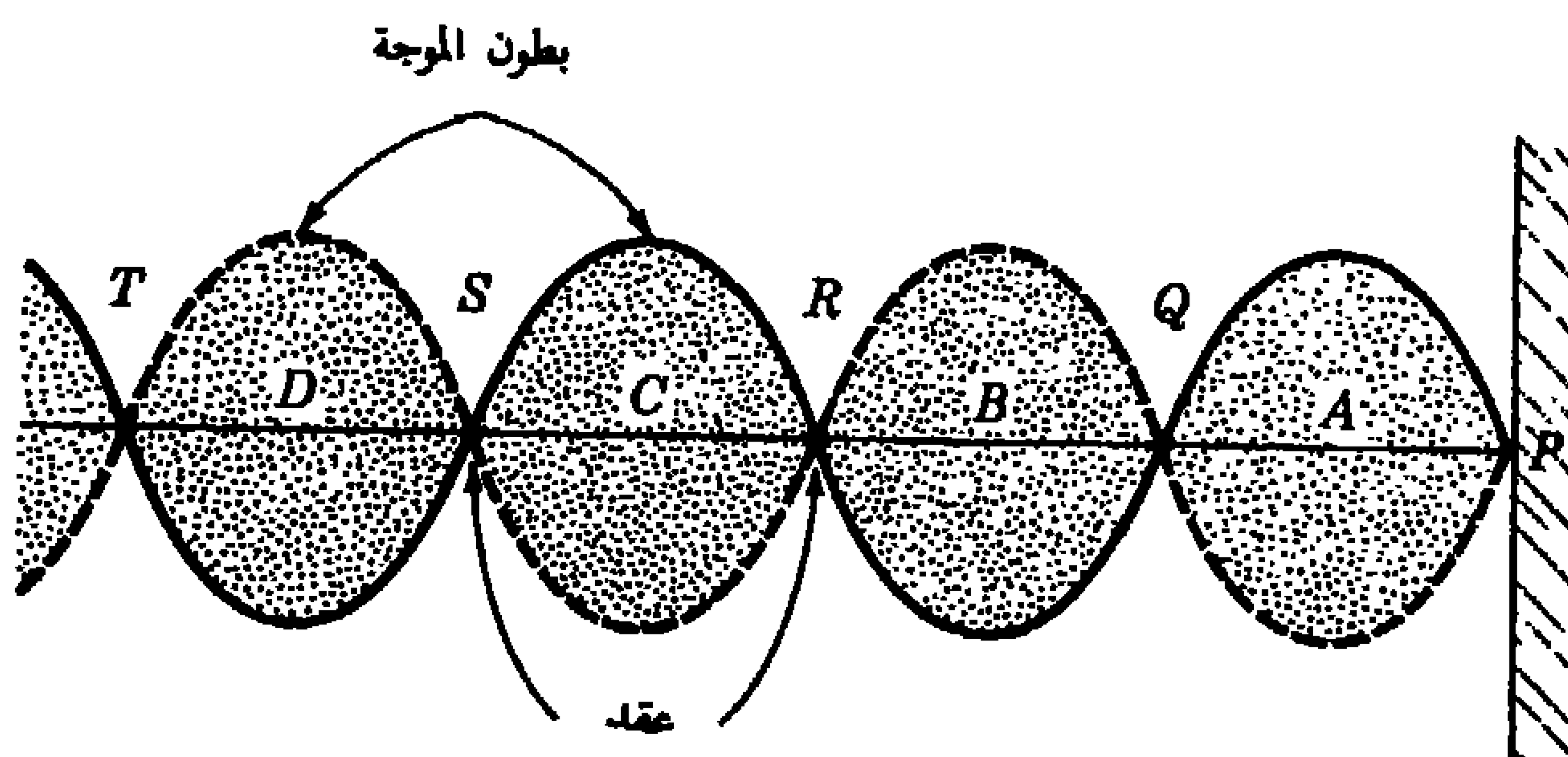
شكل (١٤ — ٦)
تجمع الموجتان الساقطة والمنعكسة سويا لينتجا موجة واحدة ذات عقدة عند الطرف الثابت .

المنقطين ، والنتيجة موضحة بالمنحنى المستمر فى الشكل . ولكى نختبر صحة عملية الجمع هذه يمكنك أن تقوم بجمع المنحنيين فى بعض النقط . لاحظ أن الموجتين تلاشى كل منهما الأخرى تماما عند الحائط ، وعليه فإن إزاحة الوتر فى هذه النقطة تساوى صفرا . بالإضافة إلى ذلك يمكنك أن ترى بسهولة أن الموجتين تستمران فى الحركة بمرور الوقت وأنهما سوف تكونان متوائمتين دائما بحيث تلاشى كل منهما الأخرى عند الحائط . ويجب أن يكون هذا صحيحا بالطبع لأن الوتر يجب أن يكون ساكنا عند هذه النقطة .

انظر الآن إلى أى نقطة أخرى تلاشى فيه كل من الموجتين الأخرى فى الشكل ١٤ – ٦ . عندئذ سوف تلاحظ أنه عندما تتحرك كل من الموجتين فى اتجاه فإنهما تلاشيان كل منهما الأخرى فى نفس هذه النقط . ومن ثم فإن لدينا نتيجة هامة جدا ، وهى أن الموجتين الساقطة والمنعكسة تتداخلان بحيث تنعدم الحركة فى نقطة معينة على الوتر طول الوقت . وتسمى نقط انعدام الحركة **بالعقد** . تعريف

من الضرورى أن نلاحظ مايحدث فى تلك النقط على الوتر التى تقع فى منتصف المسافة بين كل عقدتين متتاليتين . وفى الحقيقة فإن الإزاحة عند هذه النقط تكون أكبر مايمكن كما هو موضح فى الشكل ١٤ – ٦ . وسوف نترك لك كتمرين أن تثبت أنه مع استمرار الموجتين فى الحركة تتذبذب هذه النقط ذهابا وإيابا بين إزاحة موجبة كبيرة جدا وإزاحة سالبة كبيرة جدا . وهذا موضح فى الشكل (١٤ – ٧) . وتسمى نقط الحركة العظمى **ببطون الموجة** . تعريف

كما هو موضح فى الشكل ١٤ – ٧ ، يتذبذب الوتر ذهابا وأيابا بين الموضعين المبينين . وتمثل العقد T, S, R, Q, P تلك النقط التى تظل ساكنة ، ولا تحدث أى حركة فى الوتر عند هذه النقط . ومن ناحية اخرى ، تمثل النقط D, C, B, A بطون الموجة وهى النقط التى يتذبذب فيها الوتر ذهابا وايابا بسعة كبيرة .



شكل (١٤ – ٧)
يهتز الوتر ذهابا وإيابا بين الحدين المبينين ، ولاتحدث أى حركة عند العقد ، بينما تكون الحركة فى نهايتها العظمى عند بطون الموجة .

المسافة بين عقدتين = $\lambda/2$

وبمقارنة الشكل ١٤ – ٧ بالشكل ١٤ – ٢ سنرى أن المسافة بين بطنين متجاورتين هى $\lambda/2$ ، وأيضا المسافة بين عقدتين متجاورتين هى $\lambda/2$.

١٤ – ٤ الرنين

رأينا فى الفصل السابق أن الجسم المهتز يمكن أن يهتز بشدة كبيرة إذا كانت القوة المسببة للاهتزاز ذات تردد مناسب . وإذا كانت هذه القوة تدفع الجسم بتردد يساوى التردد الطبيعى للاهتزاز ، فإن القوة ستكون فى حالة رنين مع الجسم ، وعندئذ ستكون سعة الاهتزاز كبيرة جدا . لنستعرض الآن مايحدث لتكون القوة فى حالة رنين مع النظام المهتز .

كمثال شائع ، نعلم أنه ليس من الضرورى حقيقة أن تدفع طفلا فى أرجوحة بقوة كبيرة لكى تصل الأرجوحة إلى ارتفاع كبير . بل يكفى أن تدفع الأرجوحة دفعات دورية صغيرة عندما تكون الأرجوحة فى الموضع المناسب ، وهذا يؤدى فى نهاية الأمر إلى زيادة سعة الذبذبة . ويمكننا أن نتبين سبب صحة ذلك باستخدام المفاهيم التى تعلمناها عن الشغل . عندما يدفع الشخص الأرجوحة فى اتجاه حركتها فإنه يبذل شغلا على الأرجوحة . وتسبب هذه الطاقة ارتفاع الطفل بعض الشىء فى الذبذبة التالية . وبتكرار هذه العملية عدة مرات يزداد ارتفاع الأرجوحة تباعا كنتيجة للطاقة التى يزود بها النظام . وتتوقف زيادة سعة الذبذبة عندما تتساوى الطاقة التى يبذلها الشخص على النظام تماما مع فواقد طاقة الاحتكاك أثناء ذبذبة واحدة كاملة .

وبنفس هذه الطريقة يمكن أن تزداد سعة ذبذبة أى نظام مهتز تحت تأثير قوة حافزة دورية . لاحظ ، مع ذلك ، أن القوة الحافزة يجب أن تستخدم فى اللحظة المناسبة لكى يزود النظام بالطاقة . (إذا كانت القوة الحافزة تؤثر على النظام أثناء حركته فى الاتجاه المعاكس ، فإن النظام هو الذى سوف يبذل شغلا على الآلية الحافزة ، ولذلك فإن النظام سوف يفقد الطاقة بدلا من أن يكتسبها) . وعندما تكون القوة الحافزة متفقة فى الخطوة مع النظام المهتز بحيث تصبح السعة كبيرة يقال فى هذه الحالة أن القوة الحافزة والنظام المهتز فى حالة رنين . ولكى يحدث الرنين يجب أن يتحقق شرطان اساسيان . أولا ، يجب أن يكون تردد القوة الحافزة مساويا لتردد الاهتزاز للنظام . ثانيا ، يجب أن تكون القوة الحافزة متفقة فى الطور مع الاهتزاز . أى أن القوة يجب أن تكون متفقة فى الخطوة مع الاهتزاز .

يمكن أن نذكر أمثلة كثيرة للرنين . فأرجوحة الطفل هى واحد من هذه الأمثلة . كذلك فإن كثيرا من الساعات ذات البندول تدار بواسطة جهاز يعمل فى حالة رنين

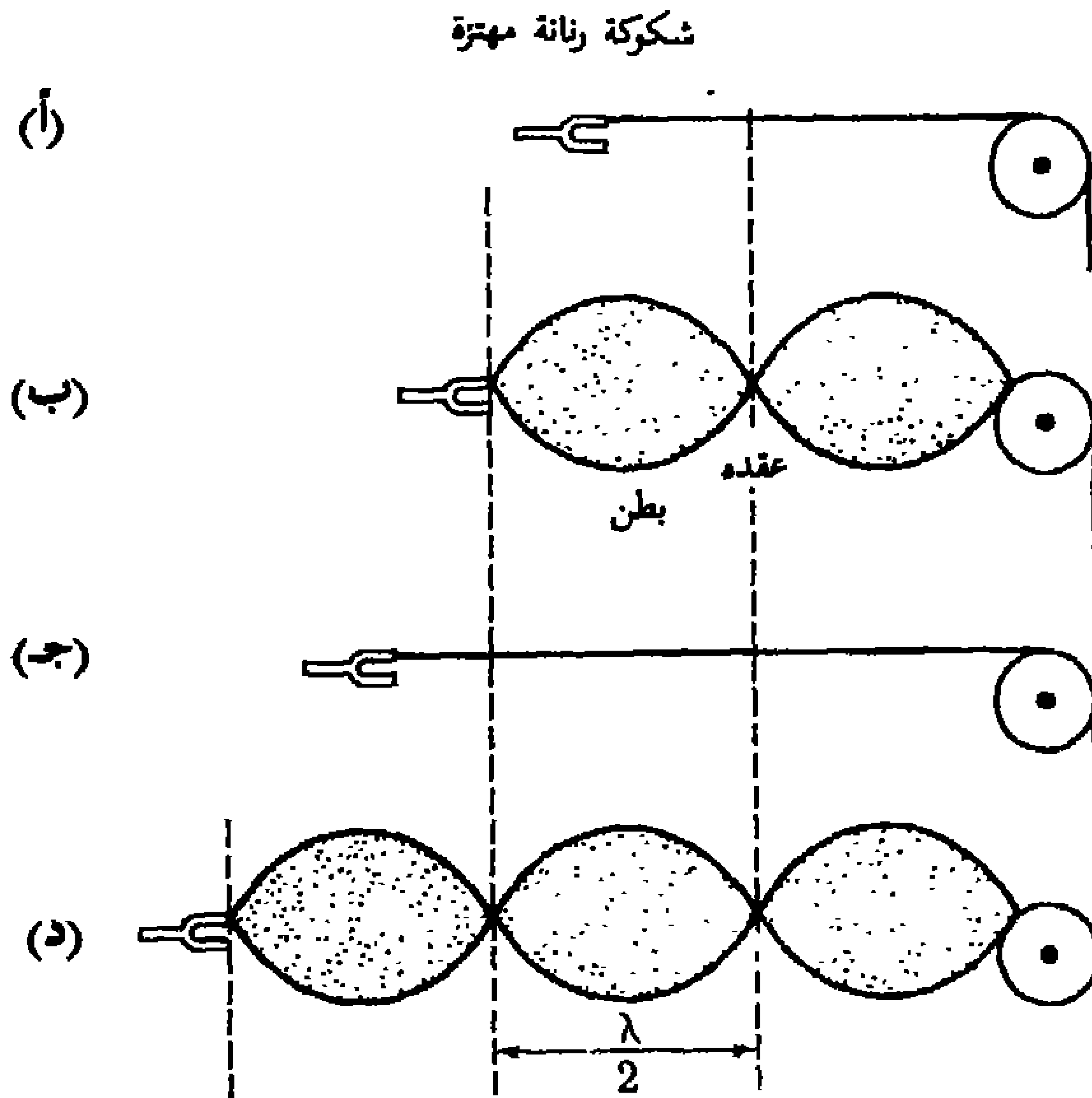
مع البندول . وأيضا تستخدم ظاهرة الرنين فى جميع الآلات الموسيقية لإنتاج الصوت المسموع ، وسوف نناقش هذا المثال بالتفصيل فيما بعد .

وليس الرنين مستحباً فى جميع الحالات . فمن المعروف مثلا أن خشخشة السيارة تصبح مزعجة جدا عند سرعة معينة ذلك أن مصدر الخشخشة ، وهو جزء معين من جسم السيارة ، يصبح فى حالة رنين مع الحركة الاهتزازية للسيارة عند هذه السرعة المعينة . ويصبح هذا النوع من الاضطراب خطيرا جدا فى السيارات التى تكون عجلاتها غير متزنة . ذلك ان الارتطام المكتوم للعجلة بالطريق يتغير تردده مع سرعة السيارة . وليس من المستغرب إذن أن تبدأ مختلف أجزاء السيارة فى الاهتزاز بشدة عند الوصول إلى تردد الرنين .

فى الجزء التالى سنقوم بمناقشة الحركات الرنينية للوتر المهتز . وسوف نرى أن حالة الرنين مع القوى الحافزة تتحقق عند أكثر من تردد واحد . وبالرغم من أن الحسابات التى سوف نجريها بالنسبة للوتر أمثلة بسيطة جدا ، فإننا سوف نرى أن الأنظمة المهتزة المعقدة ذات خصائص رنينية مشابهة بوجه عام .

١٤ - ٥ الحركة الرنينية لوتر : الموجات المستقرة (أو الواقفة)

لنعتبر مايحدث عندما يقوم مهتز بإرسال الموجات لتنتشر على وتر حقيقى كما هو مبين فى الشكل ١٤ - ٨ ، وإذا اجرينا التجربة المبينة فإننا سوف نحصل على نتائج هامة . واضح من الشكل أن أحد طرفى الوتر مثبت فى المهتز ، بينما يستقر الطرف



شكل (١٤ - ٨)
ماهى الأطوال الاخرى التى يحدث رنين الوتر عندها ؟

الآخر على بكرة كبيرة تحت تأثير قوة شد ثابتة . ويمكن زيادة طول الوتر بتحريك الشوكة الرنانة إلى اليسار كما هو مبين فى الاجزاء المتتالية من الشكل .

يظل الوتر عديم الحركة تقريبا عند معظم أطواله بالرغم من اهتزاز الشوكة الرنانة ، ويفسر ذلك كالتالى . يرسل المهتز نبضات موجية صغيرة تتحرك على الوتر لتصل إلى البكرة حيث تنعكس للخلف . وعندما تتحرك النبضة الموجية تجاه البكرة فإنها تشبه أرجوحة الطفل عندما تتحرك متباعدة عن الشخص الذى يدفعها ؛ وكأرجوحة الطفل تنعكس النبضة ثم تعود إلى الدافع ، وهو المهتز فى هذه الحالة . وعادة لايكون المهتز متحركا بالطريقة المضبوطة لكى يعكس النبضة مرة أخرى ويزودها بالتالى بالطاقة . وكما يدفع الشخص الأرجوحة بطريقة غير صحيحة ، سيؤدى هذا الدفع إلى إضعاف الحركة بدلا من تقويتها . ولهذا السبب فإن النبضات الصغيرة الصادرة من المهتز والمتحركة على الوتر تضعف عادة ، ونتيجة لذلك يظل الوتر ساكناً تقريباً كما هو موضح فى الجزء أ .

الموجة المستقرة أو الواقفة

ومع ذلك ، فعند زيادة طول الوتر ببطء ستشاهد نتيجة غريبة . ذلك أن الوتر سوف يبدأ فى الاهتزاز بشدة عند طول محدد تماما ، كما هو مبين فى الجزء ب . وفى هذه الحالة يهتز الوتر ذهابا وإيابا بين الحدين المبينين . وتنعدم الحركة تماما فى نقط معينة على الوتر ، وهذه هى العقد . وتصل شدة الاهتزاز إلى أقصاها فى نقط محددة أخرى ، وهذه هى البطون . ويسمى النمط المكون من هذه العقد والبطون **بالموجة المستقرة على الوتر** .

من السهل أن نفهم ماذا يحدث ويؤدى إلى تكوين الموجة المستقرة ، ففى هذه الحالة الخاصة جدا تصل الموجة المنعكسة من البكرة إلى المهتز فى الوقت المناسب تماما لتقويتها بواسطة المهتز . وفى لحظة انعكاس النبضة من المهتز فإن كليهما يكونان متفقين فى الخطوة (أو الطور) وهذا يؤدى إلى تقوية النبضة نتيجة لذلك ليستمر المهتز فى إضافة الطاقة إلى النبضات أثناء تحركها ذهابا وإيابا على الوتر ، ولذلك فإن النبضات تصبح كبيرة جدا .

ولكننا رأينا سابقا فى الجزء ١٤ –٣ أن النبضات المتحركة على الوتر إلى اليمين وإلى اليسار تتراكب مكونة عقدا وبطونا . نتيجة لذلك يهتز الوتر فى نمط محدد من العقد والبطون . بالإضافة إلى ذلك ، حيث أن مجموع هذه النبضات كبير جدا ، فإن هذا النمط كبير ويمكن رؤيته بسهولة . من هذا نرى أن الموجة المستقرة الكبيرة هى نتيجة لوجود المهتز فى حالة رنين مع النبضات الموجية على الوتر .

والآن ، إذا ازداد طول الوتر المبين فى الشكل ١٤ — ٨ اكثر من ذلك سوف تصل الموجات المنعكسة من البكرة إلى المهتز متأخرة قليلا عما قبل . وعندئذ لن تكون النبضات متفقة فى الطور مع المهتز ، ولهذا لن يحدث الرنين . وعليه فإن الوتر سيصبح ساكنا تقريبا كما هو مبين فى الجزء جـ من الشكل .

ولكن عندما تستمر فى زيادة طول الوتر سوف يحدث الرنين فجأة عند طول معين كما هو مبين فى الجزء د . ومرة ثانية ستصبح النبضات متفقة فى الطور مع المهتز عند وصولها إليه ، ولذلك تتكون على الوتر نبضات كبيرة ، ونتيجة لذلك تتكون على الوتر موجة مستقرة مرئية . وكما نرى ، يحدث رنين الوتر مع المهتز تحت شروط خاصة جدا . لنتبين الآن ماهى هذه الشروط بطريقة كمية .

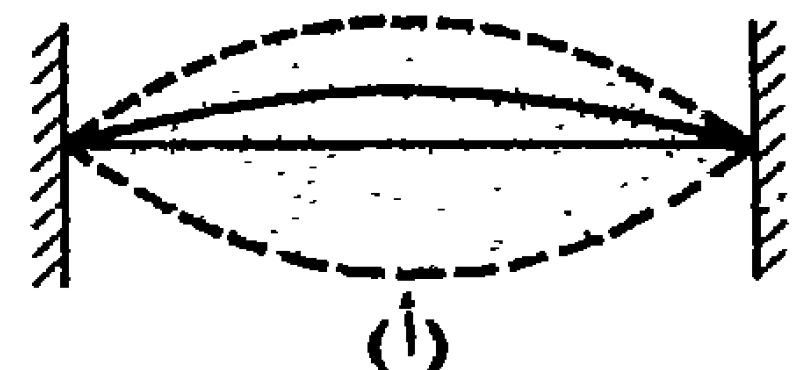
شروط الرنين

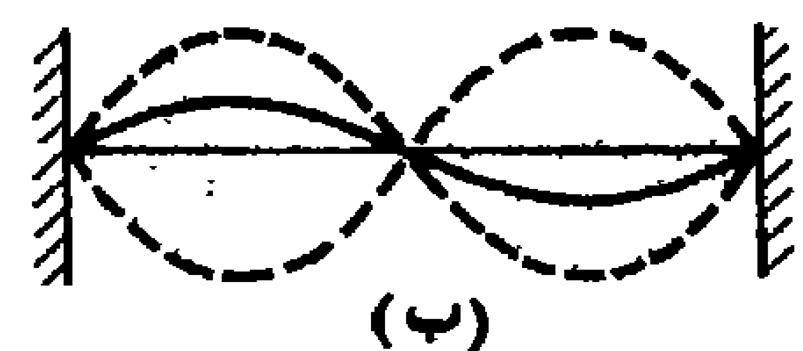
نذكر مما سبق أن المسافة بين عقدتين متتاليتين هى $\lambda/2$ ، وبفحص الشكل ١٤ — ٨ سنرى أن المهتز قريب جدا من موضع عقدة لأنه لايستطيع أن يتحرك كثيرا . إذن يمثل طرفا الوتر المهتز فى حالة رنين عقدتين . وعليه فإن الرنين يمكن أن يحدث فقط إذا كان طوله $\lambda/2$ أو $2(\lambda/2)$ أو $3(\lambda/2)$ وهكذا . وفى الحقيقة يمكننا أن نقول عامة أن رنين الوتر المثبت جيدا من طرفيه يحدث فقط إذا كان طوله مساويا لعدد صحيح من أنصاف الطول الموجى . فمثلا ، فى الاجزاء أ ، ب ، جـ ، د من الشكل ١٤ — ٩ طول الوتر L يساوى $\lambda/2, 2(\lambda/2), 3(\lambda/2), 4(\lambda/2)$ على الترتيب . إذن ، يحدث الرنين عموما إذا كان :

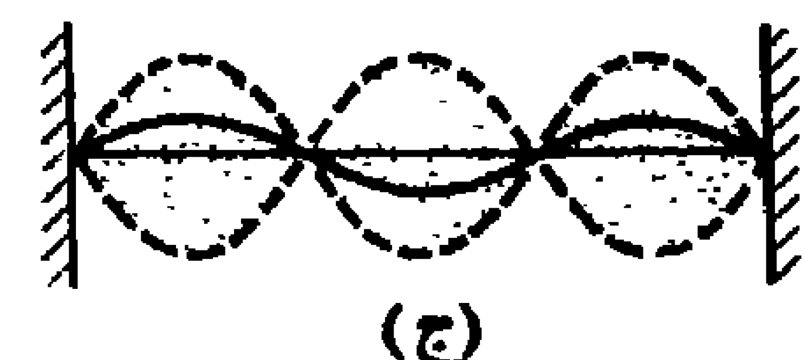
$$L = n\frac{\lambda}{2} \qquad (١٤ — ٣)$$

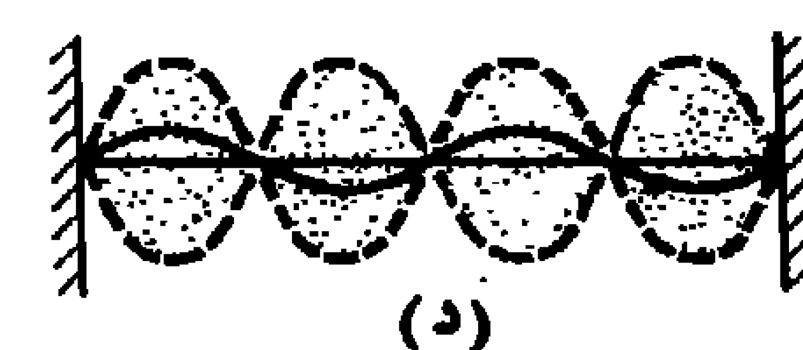
حيث : $n = 1,2,3 \ ....$

شكل (١٤ — ٩)
فى الأنماط الرنينية لاهتزاز وتر مثبت من طرفيه يجب أن تتكون عقدتان عند طرف الوتر . وهذه هى أبسط أربع موجات مستقرة ممكنة .


(أ)


(ب)


(ج)


(د)

وحيث ان الطول الموجى يرتبط بالتردد طبقا للمعادلة (١٤ — ١) ، يمكننا أن نرى مباشرة أن رنين الوتر المثبت من طرفيه يحدث فقط عند ترددات خاصة جدا . وبالاصطلاحات الفنية الحديثة يقال أن الترددات الرنينية للوتر **مكماة** ، بمعنى وجود ترددات رنينية خاصة فقط .

مثال توضيحى ١٤ — ٢ : وتر طوله 6.0 m وسرعة الموجات عليه 24 m/s . ماهى الترددات الحافزة التى يحدث عندها رنين هذا الوتر ؟ ارسم صورة للوتر لكل تردد رنينى .

طريقة الحل . تعطى الأطوال الموجية الرنينية بالمعادلة (١٤ — ٣) . إذن :

$$\lambda = \frac{2L}{n} \qquad \lambda_1 = 12 \text{ m} \qquad \lambda_2 = 6 \text{ m}$$

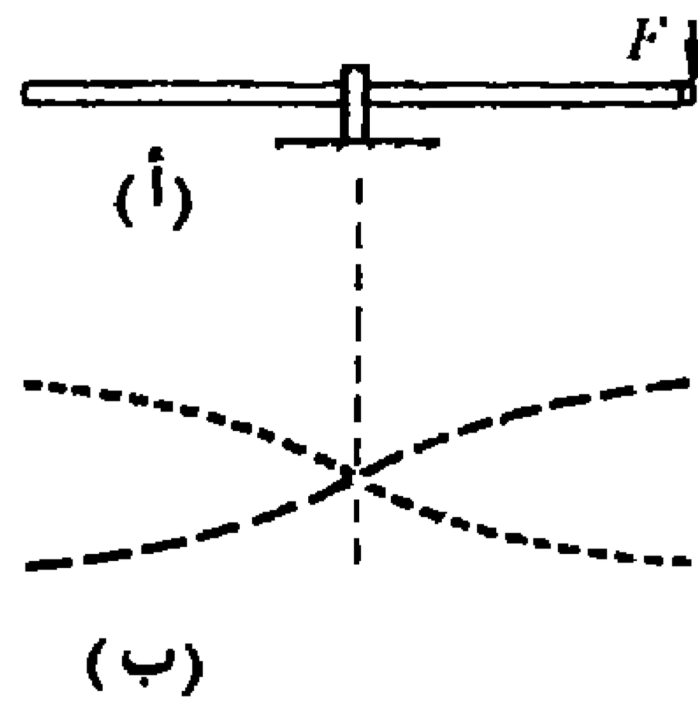
$$\lambda_3 = 4 \text{ m} \qquad \lambda_n = \frac{12}{n} \text{ m}$$

وباستخدام المعادلة (١٤ — ١) لإيجاد الترددات الرنينية ، نجد أن :

$$f = \frac{v}{\lambda} \qquad f_1 = \tfrac{24}{12} = 2 \text{ Hz} \qquad f_2 = \tfrac{24}{6} = 4 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \tfrac{24}{4} = 6 \text{ Hz} \qquad f_n = \frac{24}{12/n} = 2n \text{ Hz}$$

وتظهر أنماط اهتزاز الوتر ، أى الموجات المستقرة المختلفة ، كما فى الاجزاء أ ، ب ، جـ من الشكل (١٤ — ٩) عندما يكون التردد f_1, f_2, f_3 على الترتيب .

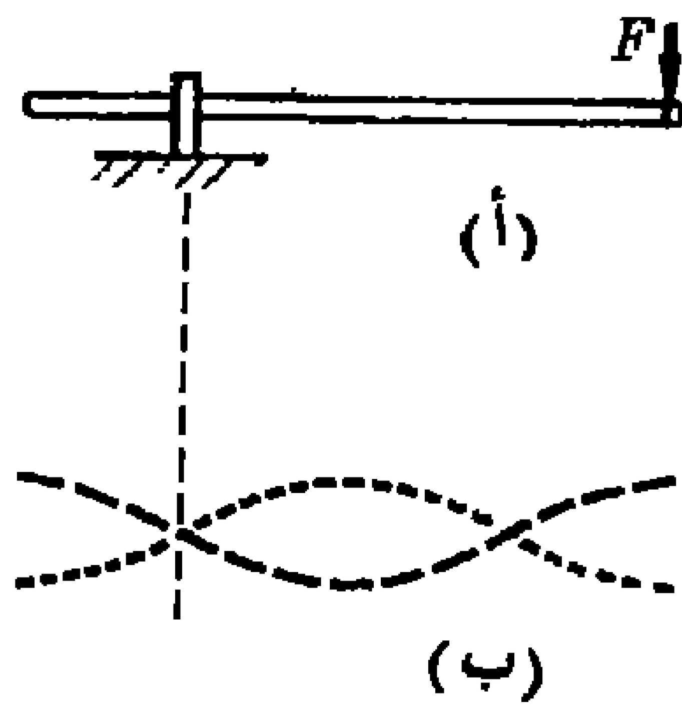


شكل (١٤ — ١٠) . تتكون الموجة المستقرة المستعرضة عند طرق القضيب كما هو مبين .

١٤ — ٦ موجات مستعرضة أخرى

لقد استنفذنا وقتا كبيرا فى دراسة الموجات المنتشرة على الأوتار نظرا لأن المبادىء التى تنطبق عليها تنطبق كذلك على كثير من الأنظمة المهتزة الأخرى . فمثلا إذا ثبت قضيب معدنى فى مركزه ثم طرق على احدى نهايتيه ، كما هو مبين فى الشكل ١٤ — ١٠ ، فإن القضيب سوف يهتز ، ويوضح الجزء ب من الشكل ١٤ — ١٠ نمط اهتزاز القضيب فى هذه الحالة .

ويجب أن يكون مركز القضيب عقدة موجية لأنه مثبت بشدة ولايمكنه أن يتحرك . وحيث أن طرفى القضيب غير مثبتين ، فلابد أن نتوقع وجود بطن بالقرب من كل منهما وإذا فرضنا أن بطن الموجة ينطبق تماما على كل من طرفى القضيب ، فإن طول القضيب سيساوى نصف الطول الموجى ، وذلك لأن المسافة بين بطنين متتاليين هى $\lambda/2$ وحيث أن $\lambda = 2L$ ، إذن يمكننا قياس تردد اهتزاز القضيب ثم استخدام المعادلة (١٤ — ١) لحساب سرعة الموجة المستعرضة فيه .



شكل (١٤ — ١١) يجب أن يكون موضع التثبيت عقدة .

وإذا كان القضيب مثبتا كما فى الشكل ١٤ — ١١ ، أى على مسافة قدرها $L/4$ من نهايته بالتحديد ، فإن الاهتزاز سيبدو كما فى الجزء ب من هذا الشكل . ومرة ثانية ، يجب أن يكون طرفا القضيب بطنين تقريبيين ، كذلك فإن نقطة التثبيت يجب أن تكون عقدة أيضا . وفى هذه الحالة :

$$\lambda = L$$

أما فى الحالة المبينة فى الشكل ١٤ — ١٠ فإن :

$$\lambda = 2L$$

وحيث أن تردد الاهتزاز يعطى بالعلاقة :

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

إذن ، تردد الاهتزاز فى كل من هاتين الحالتين سيكون كمايلى :

بالنسبة للشكل ١٤ – ١٠ : $f = \frac{v}{2L}$

بالنسبة للشكل ١٤ – ١١ : $f = \frac{v}{L}$

أى ان تردد القضيب فى الحالة المبينة فى الشكل ١٤ – ١١ ضعف تردده فى الحالة المبينة فى الشكل ١٤ – ١٠ . وبقياس f و L يمكننا حساب قيمة v فى كل حالة كما وضحنا سابقا* .

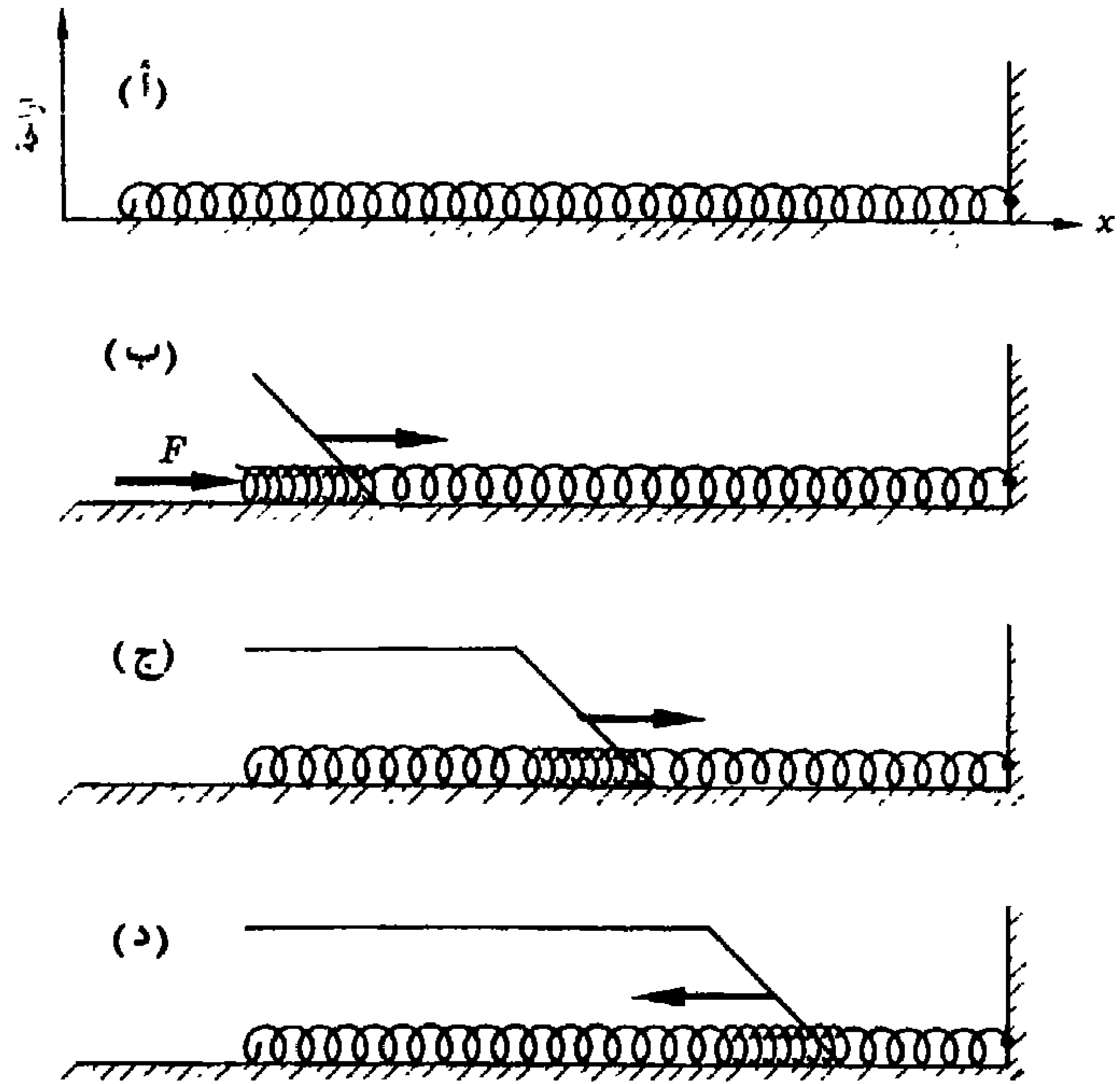
هناك أشكال كثيرة أخرى من الموجات المستعرضة . فالموجات المتكونة على سطح الماء هى موجات مستعرضة تقريبا ، لأن جزيئات الماء تتحرك رأسيا إلى أعلى وإلى أسفل بينما تتحرك الموجات أفقيا على سطح الماء . وسوف نتحدث عن هذه الموجات كثيرا عندما نبدأ دراساتنا للموجات الضوئية لأن هناك تشابها كبيرا بينهما .

كذلك عند طرق جلدة الطبلة تتحرك الموجات المستعرضة على سطحها . وتتكون مثل هذه الموجات فى الصنج أو أى لوح مستو من مادة عند اهتزازه . وهذه الموجات أكثر تعقيدا من الموجات المتكونة على وتر لأنها تنتشر فى أى اتجاه فى المستوى ، بينما تتحرك الموجات المستعرضة فى الوتر فى اتجاه واحد فقط . وفى هذه الحالة تتكون على المستوى خطوط عقدية بدلا من النقط العقدية ، وهى خطوط لايهتز فيها اللوح إطلاقا . ولكننا لن نناقش هذا السلوك هنا ، ولكننا سنتعرض له فيما بعد عند دراسة الضوء حيث سنقابل موقفا مشابها .

وفى النهاية ، يجب أن نشير أشارة سريعة لأكثر الأنواع أهمية من الموجات المستعرضة ، وهى الموجة الكهربائية المغنطيسية . وسوف نناقش هذا النوع من الموجات بعد دراسة موضوع الكهرباء . وسوف نرى عندئذ أن موجات الراديو والرادار والحرارة والموجات تحت الحمراء وموجات الضوء والموجات فوق البنفسجية وكذلك أشعة اكس هى جميعها أنواع من الموجات الكهربائية المغنطيسية . وواضح من هذه القائمة أن الموجات الكهربائية المغنطيسية ذات أهمية عملية كبيرة .

---

* تبين الحسابات التفصيلية التى تأخذ تأثيرات القصور الذاتى والجسوءة المحدودة أن هذه الحسابات تقريبية . وعمليا تتكون العقدة فى الشكل ١٤ – ١١ على بعد $0.224\,L$ وليس $0.250\,L$



شكل (١٤ - ١٢) تتحرك نبضة طولية على الزنبرك وتنعكس بواسطة الحائط . وتمثل المنحنيات السوداء الرسوم البيانية لإزاحة الزنبرك .

١٤ - ٧ الموجات الطولية

يمكننا إجراء تجربة هامة باستخدام زنبرك طويل جدا موضوع على منضدة ملساء ومثبت من أحد طرفيه ، ويوضح الشكل ١٤ - ١٢ أ - د صورة لهذه التجربة ولكنها ليست أحسن الصور من وجهة النظر العملية .

يمثل الجزء أ من الشكل الزنبرك مستقرا على المنضدة فى حالة توازن . وإذا ضغط الزنبرك فجأة كما هو فى الجزء ب فإن الحلقات القريبة من الطرف سوف تنضغط قبل أن يتعرض باقى الزنبرك للاضطراب . وعندئذ سوف تؤثر الحلقات المنضغطة بقوة معينة على الحلقات التى تقع على يمينها ، وعليه فإن الانضغاط سوف يتحرك فى الزنبرك كما هو مبين . وعندما يصل الانضغاط إلى الطرف الثابت فإنه سوف ينعكس ويتحرك إلى اليسار كما هو مبين فى الجزء د .

من الواضح أن هذه الموجة ليست موجة مستعرضة ، لأن جزيئات الزنبرك تهتز فى الواقع ذهابا وإيابا فى اتجاه الزنبرك ، أى فى اتجاه انتشار الموجة . وتسمى مثل هذه الموجة الانضغاطية ، التى تتحرك فيها جزيئات الوسط فى اتجاه انتشار الموجة **بالموجة الطولية** .

تعريف

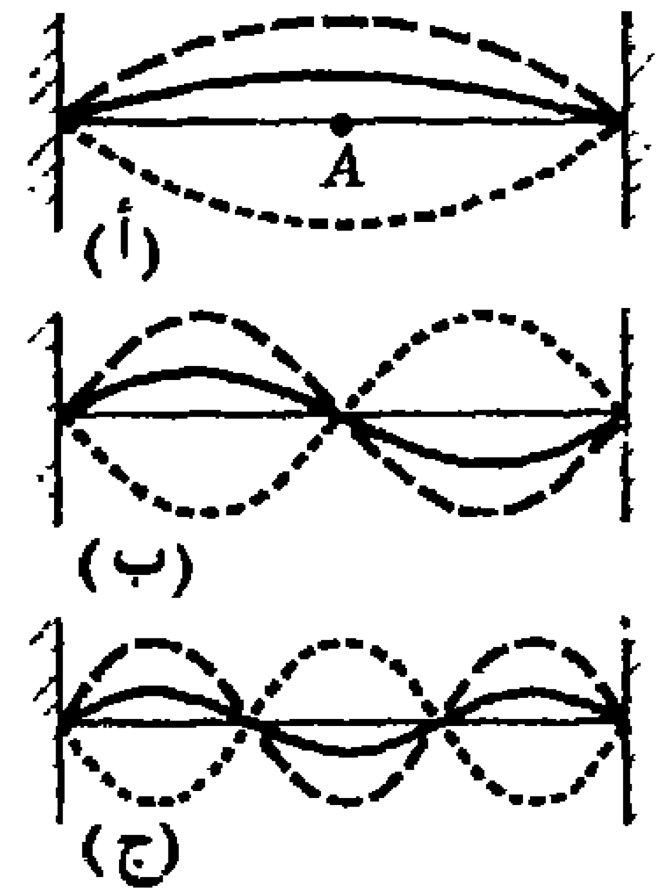
قد تقابلنا بعض الصعوبة عندما نحاول تمثيل الموجة الطولية بيانيا . ففى الموجة المستعرضة تتحرك الجزيئات إلى أعلى وإلى أسفل مثلا ، ولذلك فإن الإزاحة تمثل فى الرسم البيانى إلى أعلى وإلى أسفل أيضا . ولكن من الصعب هنا أن نرسم إزاحة الزنبرك فى نفس اتجاه حدوثها ، لأن المسافة التى تقطعها الموجة والإزاحة تقعان كلتاهما فى الاتجاه الأفقى . للتغلب على هذه الصعوبة سوف نمثل مقدار الإزاحة رأسيا كما هو موضح بالمنحنى الأسود فى الشكل ١٤ – ١٢ . وهنا يجب أن نعلم جيدا أن الحركة لاتحدث أبدا فى هذا الاتجاه فى حالة الموجة الطولية ، وأننا نرسم هذا الشكل البيانى بهذه الطريقة للتوضيح فقط .

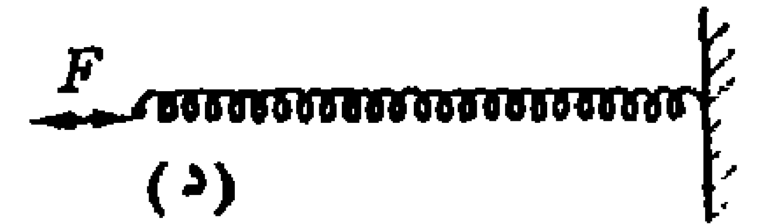
١٤ – ٨ الموجات التضاغطية المستقرة على زنبرك

من الواضح أن هناك ملامح كثيرة مشتركة بين الموجة الطولية على زنبرك والموجة المستعرضة على وتر . فإذا تحركت موجة تضاغطية على زنبرك فإن الموجة وطاقتها سوف ينعكسان عند وصول الموجة إلى نهاية الزنبرك ، وهذه الموجة المنعكسة يمكنها أن تتداخل مع موجات أخرى ساقطة من المصدر . فإذا تحققت العلاقة المناسبة بين تردد المصدر الحافز الذى يسبب اهتزاز طرف الوتر ومختلف ثوابت الزنبرك فإن الرنين سوف يحدث . وهذا ماسوف ندرسه الآن عن الأنظمة الزنبركية .

وكما فى حالة رنين الأوتار ، توجد دائما عقدة بالقرب من موضع المصدر الحافز لأن الزنبرك نفسه سوف يتحرك فى حالة الرنين حركة أكبر كثيرا من المصدر الحافز ، وأيضا ، إذا كان الطرف الآخر للزنبرك مثبتا جيدا فى حائط أو جسم آخر مشابه ، فإن هذا الطرف سيكون عقدة كذلك . عندئذ يجب أن تظهر الحركة الرنينية للزنبرك كما هو موضح بالرسم البيانى فى الشكل (١٤ – ١٣) .

شكل (١٤ – ١٣)
تتكون الموجات المستقرة نتيجة للاهتزاز الطولى للزنبرك .





لاحظ أن حركة الزنبرك تحدث فى الاتجاه الأفقى بالرغم من أننا رسمنا ازاحة حلقات الزنبرك فى موازاته رأسيا . فمثلا ، النقطة A فى الشكل ١٤ – ١٣ أ تعنى أن النقطة المركزية للزنبرك تهتز أفقيا ذهابا وإيابا وأن سعة الاهتزاز تمثل بالموجة المنقطة . يلاحظ أيضا من نمط الاهتزاز الموضح فى الشكل ١٤ – ١٣ ب أن النقطة المركزية لاتتحرك على الاطلاق . إذن ، يمكن أن تكون النقطة المركزية بطنا أو عقدة ، ويعتمد ذلك على التردد الذى يسبب رنين الزنبرك .

تنطبق نفس العلاقات الخاصة بانتشار الموجات على وتر أيضا على الموجات المنتشرة على زنبرك . وواضح من الشكل ١٤ – ١٣ أن المسافة بين عقدتين متتاليتين تساوى $\lambda/2$ أيضا كما فى حالة الوتر . كذلك فإن طول الزنبرك يجب أن يكون مساويا لعدد صحيح من أنصاف الطول الموجى وذلك فى حالة الرنين . أى أن الطول الموجى فى حالة الرنين يعطى بالعلاقة .

$$n\frac{\lambda}{2} = L$$

حيث $n = 1, 2, \ldots$

وبالتعويض من هذه العلاقة فى المعادلة $\lambda = v/f$ سنجد أن الترددات الرنينية للزنبرك تعطى بالعلاقة :

$$f = n\frac{v}{2L}$$

حيث $n = 1, 2, \ldots$

مثال توضيحى ١٤ – ٣ : اهتز زنبرك طوله 300 cm اهتزازا رنينيا فى ثلاث قطع (كل منها بين عقدتين) عندما كان التردد الحافز 20 Hz . ماهى سرعة الموجة فى الزنبرك ؟

طريقة الحل . يهتز الزنبرك كما فى الشكل ١٤ – ١٣ جـ . وواضح فى هذه الحالة أن :

$$3\frac{\lambda}{2} = L$$

أو :

$$\lambda = 200 \text{ cm}$$

وبالتعويض عن $f = 20$ Hz فى العلاقة $\lambda = v/f$ نجد أن :

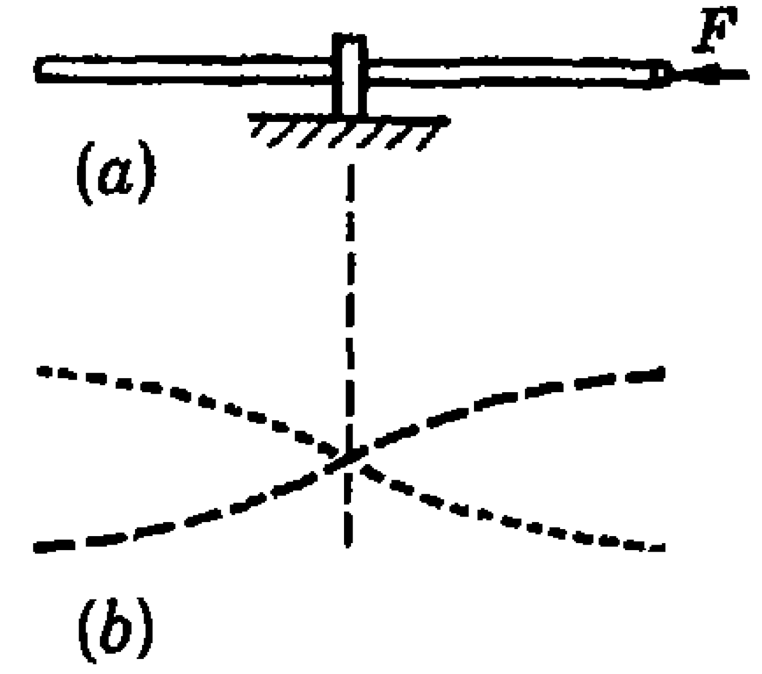
$$v = (20 \text{ s}^{-1})(200 \text{ cm}) = 4000 \text{ cm/s}$$

كان فى الإمكان بالطبع أن نعوض ببساطة فى المعادلة :

$$f = n\frac{v}{2L}$$

المعطاه سابقا ، حيث $n = 3$. ومع ذلك فإن معظم الفيزيائيين لايفضلون حفظ معادلات مختلفة للحالات المختلفة ، إذ يستخدمون عادة عدد أنصاف الطول الموجى فى الزنبرك كله لإيجاد λ ثم يستخدمون العلاقة $f = v/\lambda$ لإيجاد المجهول . وفى الحقيقة فإن الأغلبية العظمى من حالات الرنين التى سوف نقابلها يمكن أن توصف باستخدام هذه العلاقة ودراسة النظام الرنينى ، وليس من الضرورى إذن أن نحفظ معادلة لكل حالة .

١٤ – ٩ الموجات التضاغطية على قضيب



شكل (١٤ – ١٤) تنشأ موجات طولية مستقرة عند الطرف على القضيب كما هو مبين .

ناقشنا سابقا الاهتزاز المستعرض للقضيب ، ومع ذلك فإن من الممكن أن يهتز القضيب اهتزازا طوليا كذلك . وهناك طرق كثيرة ممكنة لتحقيق ذلك ، وربما كانت أبسط الطرق هي أن يطرق طرف القضيب كما هو مبين فى الشكل ١٤ – ١٤ أ .

تسبب الطرقة على طرف القضيب تكون موجة تضاغطية تسير فى القضيب تجاه الطرف الآخر . وهذه الموجة معقدة جدا ، وتتكون فى الواقع من مجموعة كبيرة من الموجات ذات ترددات مختلفة . وحيث أن الترددات الرنينية للقضيب محدودة تماما ، لذلك فإنه سوف يهتز رنينيا استجابة لتردد واحد من هذه المجموعة .

وفى هذه الحالة الخاصة يجب أن تتكون عقدة فى مركز القضيب وبطنان عند طرفيه ، ويوضح الشكل ١٤ – ١٤ أ أقل تردد رنينى لهذا النمط الاهتزازى . تذكر أن حركة القضيب طوليه بالرغم من أن الرسم البيانى للحركة مشابه لحالة الاهتزاز المستعرض . من الواضح فى هذه الحالة أن طول القضيب يساوى نصف الطول الموجى ، فإذا كان طول القضيب L ، معلوما فإن الطول الموجى سيكون إذن معلوما . فإذا كان تردد اهتزاز القضيب معلوما كذلك ، يمكننا بسهولة حساب سرعة الموجات التضاغطية فى مادة القضيب باستخدام العلاقة $\lambda = v/f$ (يمكن قياس تردد اهتزاز القضيب بطريقة بسيطة وهى مقارنة الصوت الصادر من القضيب بالصوت الصادر من شوكة رنانة ترددها معلوم . وسوف نناقش فيما بعد طرقا أكثر دقة لتعيين تردد الاهتزاز الطولى لقضيب) . ويمثل الجدول ١٤ – ١ بعض القيم الفعلية لسرعة الموجات التضاغطية فى مواد مختلفة .

جدول (١٤ – ١) سرعة الموجات التضاغطية فى مواد مختلفة

المادة	السرعة m/s
هواء (0°C)	331
ماء (15°C)	1447
نحاس	3500
زجاج	4000–5500
حديد مطاوع	4900–5100
صلب	5000

هناك ترددات رنينية أخرى لاهتزاز القضيب المبين فى الشكل ١٤ – ١٤ ، والترددات الممكنة هى تلك التى تتكون فيها عقدة فى مركز القضيب وبطنان عند طرفيه . وسوف نترك للقارىء أن يوجد بنفسه التردد الرنينى التالى لاهتزاز القضيب فى هذه الحالة . وعندئذ سيتضح أنه لابد من وجود ثلاث عقد على القضيب . (لماذا يعتبر نمط الاهتزاز بعقدتين على القضيب نمطا ممنوعا ؟) وحيث أن فواقد الطاقة نتيجة للزوجة تصبح أكثر أهمية عند الترددات العالية ، فإن هذه الأنماط الاهتزازية تضعف وتتضاءل بسرعة ، ولذلك فإن طاقتها تظهر كحرارة ويتوقف القضيب عن الاهتزاز .

تعتمد سرعة الموجات التضاغطية فى المواد المختلفة على كثافة ومرونة هذه المواد . ويمكننا إثبات أن سرعة هذه الموجات فى السوائل تعطى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}} \qquad (١٤ – ٤)$$

حيث d كثافة المادة ، E معامل الحجم المعرف بالمعادلة (٩ — ٨) . لاحظ أن الوحدات الواجب استخدامها فى هذه العلاقة يجب أن تكون متساوية دائما . وفى حالة القضبان يجب استخدام معامل يونج Y بدلا من معامل المرونة الحجمية E .

مثال توضيحى ١٤ — ٤ : إذا كان طول القضيب المبين فى الشكل ١٤ — ١٤ هو 0.925 m وتردده الرنينى فى هذه الحالة هو 2700 cps ، أوجد معامل يونج للمعدن إذا كانت كثافته $7.86\ g/cm^3$.

طريقة الحل . نحتاج أولا إلى ايجاد السرعة v وذلك باستخدام المعادلة (١٤ — ٤) ومن الشكل ١٤ — ١٤ . نرى أن طول القضيب وقدره 0.925 m يكافىء $\lambda/2$ ، إذن $\lambda = 1.85$ m وبتطبيق العلاقة $v = \lambda f$ (وباستخدام الوحدات SI) نحصل على :

$$v = (1.85\ \mathrm{m})(2700\ \mathrm{s^{-1}}) = 5000\ \mathrm{m/s}$$

ومن المعادلة (١٤ — ٤) نجد أن :

$$(5.00)(10^3\ \mathrm{m/s}) = \sqrt{\frac{Y}{7.86 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}}}$$

أو :

$$Y \approx 2.0 \times 10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$$

وبالرجوع إلى الجدول ٩ — ٢ الذى يمثل معامل يونج لمختلف المواد سنجد أن القضيب قد يكون مصنوعا من الحديد .

ملخص

المذبذب الذى يتحرك حركة توافقية بسيطة يمكنه أن يكون موجة جيبية على وتر . المسافة بين قمتى موجة متجاورتين تساوى الطول الموجى للموجة λ، ويرتبط الطول الموجى λ بتردد الاهتزاز f وسرعة الموجة v بالعلاقة $\lambda = v/f$. وهذه علاقة عامة تنطبق على جميع الموجات .

ينص مبدأ تراكب الموجات على أن الجسيم الذى يقع تحت تأثيرا اضطرابين موجيين أو أكثر يستجيب للمجموع الاتجاهى للاضطرابين المنفردين .

يهتز الوتر رنينيا تحت تأثير قوة حافزة تتبع قانون الحركة التوافقية البسيطة تحت شروط معينة . يحدث الرنين فى حالة الوتر المثبت جيدا من طرفيه إذا كان طول الوتر $n(\lambda/2)$ ، حيث n أى عدد صحيح . عندئذ يهتز الوتر بنمط ثابت معين يسمى الموجه المستقرة (أو الواقفة) . فى مثل هذا النمط تنعدم الحركة تماما فى نقط معينة تسمى العقد . تصل سعة الاهتزاز إلى أقصى قيمة فى نقط معينة على الوتر تسمى البطون . المسافة بين عقدتين (أو بطنين) متتاليتين تساوى دائما $\lambda/2$ فى الموجة المستقرة (أو الواقفة) .

عندما تتعرض الجزيئات لاضطراب موجى تتحرك عموديا على اتجاه انتشار الموجة ، يقال أن هذه الموجة مستعرضة . من الأمثلة النموذجية للموجات المستعرضة الموجات على وتر والموجات الكهربائية المغنطيسية . ولكن إذا كانت الجزيئات تتحرك فى اتجاه انتشار الموجة ، يقال أن هذه الموجة تضاغطية أو طولية . من أمثلة هذا النوع الموجات التضاغطية على زنبرك أو فى الغازات والسوائل والجوامد .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – تخطيط رسم بيانى لموجة جيبية تتحرك على وتر وتوضيح الملامح التالية بالنسبة لها : القمة ، القرار ، الطول الموجى ، السعة .

٢ – توضيح مايحدث عندما تصل نبضة موجية إلى الطرف المثبت والطرف الحر لوتر وذلك بالرسم .

٣ – ذكر العلاقة بين λ, v, f لأى موجة .

٤ – رسم عدد من الموجات الواقفة (أو المستقرة) لوتر مثبت جيدا من طرفيه وتوضيح مواقع العقد والبطون . استخدام عدد القطع فى الموجة المستقرة لكتابة العلاقة بين L, $\lambda/2$ لكل نمط اهتزاز ترسمه ، ثم حساب v أو f للوتر بمعلومية L وأى من f أو v .

٥ – شرح الفرق بين الموجة المستعرضة والموجة الطولية واعطاء أمثلة لكل منهما .

٦ – رسم الموجة التضاغطية المستقرة لنمط الرنين فى الحالات المختلفة الآتية :

(أ) وتر مثبت جيدا من كلا طرفيه ، (ب) قضيب مثبت من نقطة واحدة عندما تبعد هذه النقطة مسافة قدرها $0.5\ L$ أو $0.25\ L$ عن احد طرفيه .

٧ – حساب تردد الرنين لكل من الحالات المدرجة فى البند ٦ بمعلومية البيانات الكافية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الطول الموجى

القمة ، القرار

$\lambda = v\tau = v/f$

الموجة المستعرضة ، الموجة الطولية

الرنين ، الموجة المستقرة (أو الواقفة)

العقدة ، البطن

متفق الطور

طول الفلقة $\lambda/2$

اسئلة وتخمينات

١ – تتحرك النبضتان الموجيتان المثاليتان الموضحتان فى الشكل م١٤ – ١ على وتر بسرعة قدرها 20 m/s . بين بالرسم شكل الوتر بعد مرور 0.40 s كرر هذا العمل بعد مرور 0.20 s .

٢ – اذكر الحجج والبراهين الفيزيائية الكيفية لحقيقة أن سرعة الموجات المستعرضة على وتر يجب أن تزداد بزيادة الشد وتقل بزيادة كتلة وحدة الطول من الوتر .

٣ – تصنع أوتار بعض الآلات الموسيقية الوترية من أمعاء القطط الملفوف عليها سلك دقيق . مافائدة السلك الملفوف ؟

٤ – يهتز وتر مثبت من طرفيه مع تكون أربع بطون عليه ، أى أنه منقسم إلى اربع قطع . هل يمكننا أن نلمس الوتر بحد السكين دون أن يضطرب اهتزازه ؟ اشرح .

٥ – يقوم مذبذب متغير التردد بارسال الموجات إلى وتر (طوله L) يمكن اعتبار طرفيه عقدتين . ثبت الوتر فى نقطة تبعد مسافة $L/5$ عن أحد طرفيه بمشبك صغير بحيث أمتنعت حركة الوتر فى هذه النقطة بالرغم من أن المشبك لايزال يسمح للطاقة بالمرور . صف الموجات المستقرة التى سوف تلاحظ على الوتر عند زيادة تردد المذبذب ببطء ابتداء من قيمة منخفضة جدا .

٦ – تحتوى اجزاء الوتر الصغيرة القريبة من البطون على طاقة حركة كبيرة . اشرح كيف تنتقل الطاقة من المصدر إلى البطون بالرغم من أن طاقة حركة اجزاء الوتر القريبة من العقد صغيرة جدا .

٧ – عند رنين الوتر تلاشى كل من الموجتين الساقطة والمنعكسة الأخرى عند مواضع العقد . هل فقدت الطاقة ؟ ماذا حدث لها ؟

٨ – وصل كل من طرفى وتر مشدود بأحد مذبذبين متماثلين تماما . وضبط هذان المذبذبين بحيث يهتز الوتر اهتزازا رنينيا مستعرضا عندما يعمل احد المذبذبين فقط . هل يحدث الرنين عندما يعمل المذبذبان فى نفس الوقت ؟ وإذا كان هذا صحيحا ، فتحت أى شروط يحدث ذلك ؟

٩ – تتمدد جميع المعادن العادية عند تسخينها . اقترح طريقة لمراقبة تغير درجة حرارة سلك باستخدام ظاهرة الاهتزاز الرنينى . يستطيل السلك المصنوع من الصلب حوالى 0.001% عند تغير درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة . هل تعتقد أن طريقة الاهتزاز عملية ؟

١٠ – هل يمكن أن تؤدى موجتان متماثلتان تسيران فى نفس الاتجاه على وتر إلى تكوين موجة مستقرة ؟

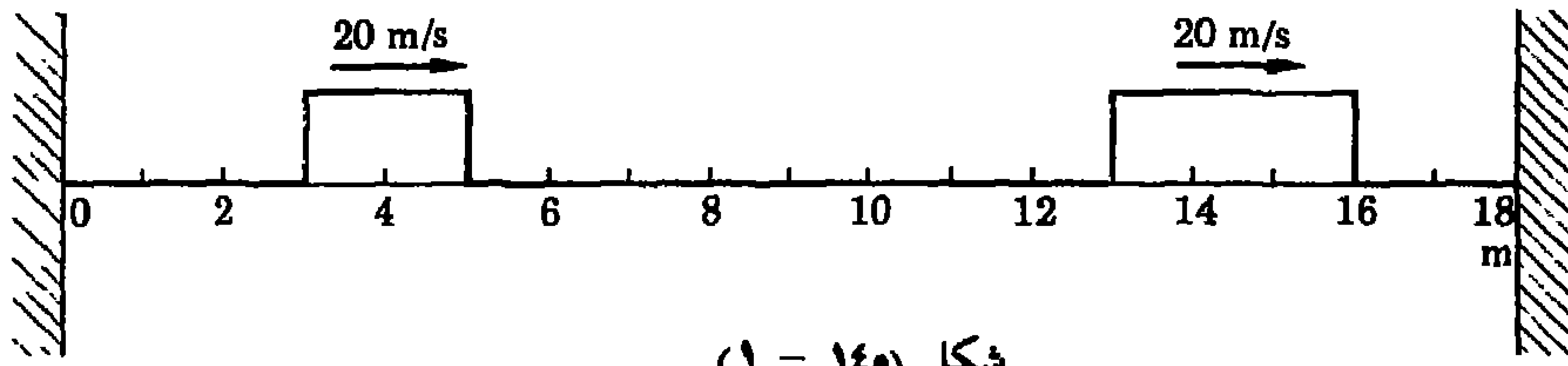
١١ – أسقط قضيبا من المعدن أو قضيبا زجاجيا أو مسطرة خشبية على أحد الطرفين على أرضية صلبة . ومن الصوت الناتج من ذلك قدر التردد الاساسى للرنين ومنه قدر سرعة الموجة التضاغطية والضوئية فى المادة المصنوع منها .

١٢ – ضبط وتر جيتار مصنوع من الصلب على نغمة ترددها 330 Hz . قدر بالتقريب التغير فى تردد الوتر عندما تنخفض درجة الحرارة بمقدار 20°C . (ق)

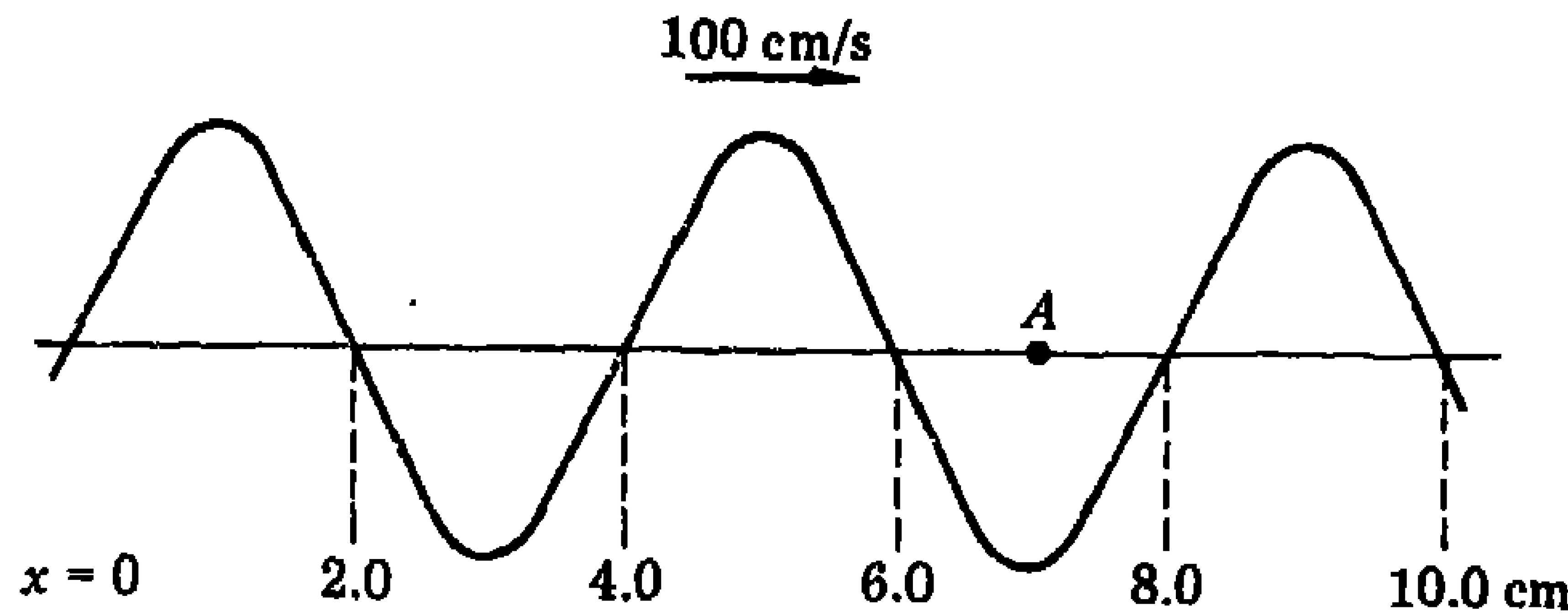
مسـائـل

١ – اعتبر النبضتين الموجيتين المبينتين فى الشكل م١٤ – ١ اللتين تتحركان على الوتر بسرعة قدرها 20 m/s . بعد أى زمن من اللحظة الحالية ستظهر النبضتان مرة ثانية بنفس الشكل المبين ؟

٢ – تتحرك الموجة المبينة فى الشكل م١٤ – ٢ تجاه اليمين بسرعة قدرها 100 m/s . (أ) ماعدد قمم الموجة الذى يصل إلى النقطة A فى الثانية ؟ (ب) ماهو الطول الموجى للموجة ؟ (جـ) ماهو تردد الموجة كما يحسب من العلاقة $\lambda = v/f$ (د) قارن الاجابتين بالجزءين (أ) ، (جـ) .



شكل (م١٤ – ١)



شكل (م١٤ – ٢)

٣ – يندفع الريح بشدة على سلك تليفون مشدود بين قائمين البعد بينهما 15 m ، ونتيجة لذلك يطن السلك فى الريح بتردد قدره 20 Hz ، ولذلك يمكننا أن نفترض أن السلك يهتز بذلك التردد . بفرض أن نقطتى تثبيت السلك فى القائمين هما عقدتان ، (أ) ماهو الطول الموجى المحتمل ؟ (ب) ماهى سرعة الموجة التى يسببها الريح فى السلك ؟

٤ – شد وتر « وزنه » 4.0 g وطوله 2.0 m افقيا بوضع احد الطرفين على بكرة وتعليق كتلة قدرها 1.0 kg فيه . اوجد سرعة الموجة المستعرضة فى الوتر .

٥ – ماهو الثقل الذى يجب تعليقه فى طرف خيط طوله 200 cm لكى تكون سرعة الموجات المستعرضة فيه 400 cm/s ، علما بأن « وزن » كل 100 cm من الخيط هو 0.50 g ؟ .

٦ – سلك مشدود بين نقطتين البعد بينهما 50 cm . وعندما نقر السلك بالقرب من المركز اصدر نفس النغمة التى تصدرها شوكة رنانة ترددها 250 cps . اوجد الطول الموجى وسرعة الموجة فى هذا السلك . تلميح : حيث أن السلك قد نقر من مركزه ، فإنه سوف يهتز بحيث يتكون علية بطن واحدة وعقدتين عند الطرفين .

٧ – يهتز سلك طوله 80 cm بحيث تتكون عليه أربع عقد ، اثنتان منهما عند الطرفين . أوجد (أ) الطول الموجى ، (ب) سرعة الموجة فى السلك إذا كان تردد اهتزازه 500 Hz .

٨ – يهتز سلك مثبت من طرفيه بشدة فى ثلاث قطع عندما يكون التردد الحافز f_1 وفى أربع قطع عندما يكون التردد الحافز f_2 . أوجد النسبة f_1/f_2 ؟

٩ – وتران متساويان تماما فى الشد وفى الطول ، ومع ذلك فإن أقل تردد رنينى لأحدهما يساوى نصف تردد الآخر فقط . (أ) أيهما اكبر فى الكتلة لوحدة الطول ؟ (ب) ماهى النسبة بين كتلتى وحدة الطول لهذين السلكين ؟

١٠ – يهتز وتر مثبت من طرفيه اهتزاز رنينيا بعدة ترددات ، أقلها 100 Hz . ماهى الترددات الرنينية الثلاثة التالية ؟

١١ – يهتز وتر اهتزاز رنينيا فى ثلاث قطع عندما يكون التردد الحافز 60 Hz اكتب أربعة ترددات رنينية أخرى لهذا الوتر .

١٢ – قضيب حديدى طوله 100 cm مثبت فى منتصفه ويهتز اهتزازا طوليا . (أ) أوجد أقل تردد رنينى لهذا القضيب . (ب) أوجد أقل تردد رنينى له إذا كان مثبتا عند أحد طرفيه . $(v = 5 \times 10^3 \text{ m/s})$

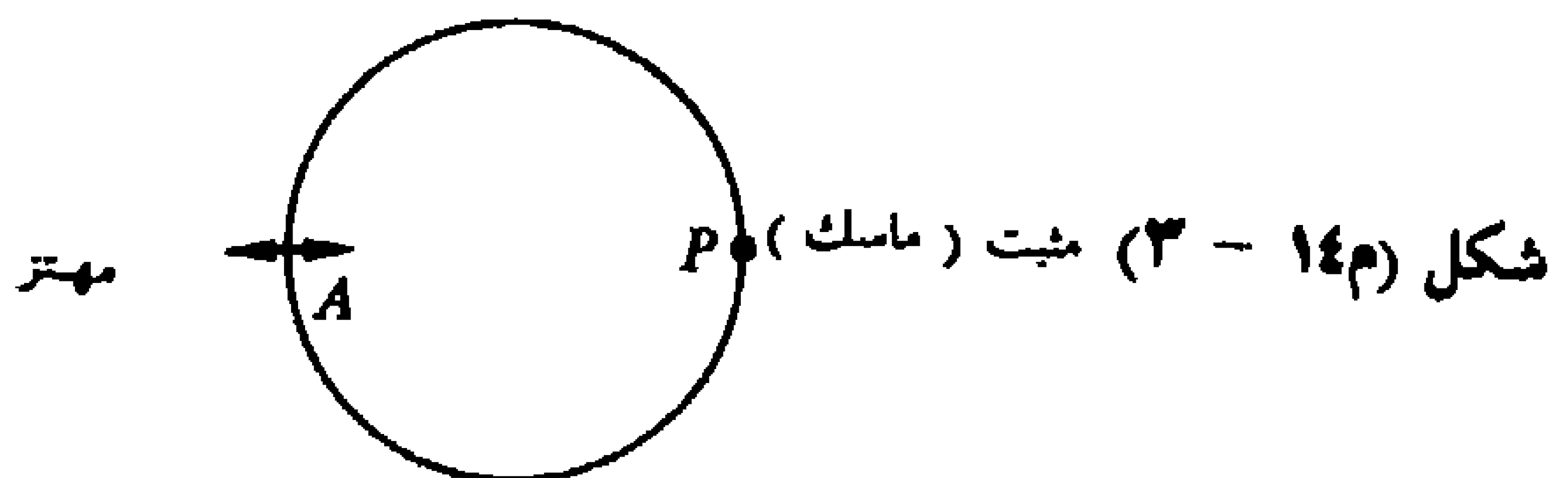
١٣ – قضيب حديدى طوله 100 cm ومثبت على بعد 25 cm من أحد طرفيه . أوجد أقل تردد رنينى للموجات الطولية فيه . $(v = 5 \times 10^3 \text{ m/s})$.

١٤ – زنبرك ملتف طوله 4.0 m يهتز اهتزازا طوليا تحت تأثير مهتز متصل بأحد طرفيه . وعندما كان التردد الحافز 2.0 Hz ، كان الزنبرك يهتز مع تكون خمس بطون عليه . ماهى سرعة الموجات التضاغطية فى الزنبرك ؟ افترض أن طرفى الزنبرك عقدتان .

١٥ – قضيب من الصلب طوله 1.00 m مثبت من أحد طرفيه . ماهى الترددات الرنينية الثلاث الأولى للموجات التضاغطية ؟ $(v = 5000 \text{ m/s})$

١٦* – زنبرك ملتف طوله 4.0 m موضوع على منضدة ملساء وأحد طرفيه ثابت والآخر حر . أوجد بعض الترددات التى يمكن أن تضرب بها النهاية الحرة للزنبرك بحيث تتكون فيه موجات تضاغطية رنينية ، علما بأن سرعة الموجات التضاغطية فيه 800 cm/s .

١٧* – يمثل الشكل م١٤ –٣ سلكا من الصلب على هيئة حلقة نصف قطرها 20 cm . ثبتت الحلقة جيدا عند النقطة P وأرسلت فيها موجات مستعرضة بواسطة مهتز عند النقطة A . بفرض أن النقطتين P ، A عقدتان ، اوجد الترددات الرنينية الثلاثة الأولى لهذه الحلقة . (سرعة الموجات المستعرضة فى الحلقة هى $v = 0.4$ m/s) .



شكل (م١٤ – ٣)

الفصـــل الخـامس عشـــر

الصـــوت

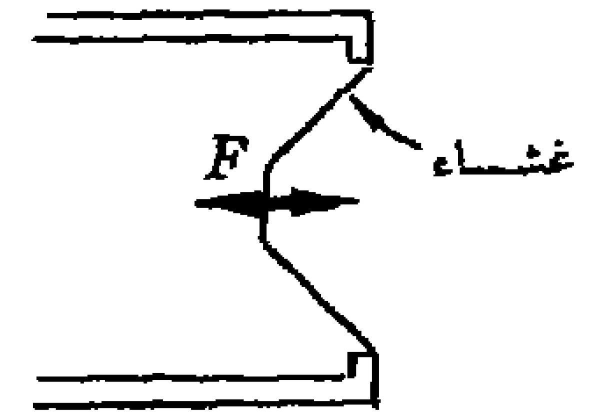
سنطبق الآن المفاهيم المتعلقة بالحركة الموجية والتى ناقشناها فى الفصل السابق على نوع معين من الحركة الموجية وهو الصوت . وليست دراسة الصوت مهمة فى حد ذاتها فقط ، ولكنها بالاضافة إلى ذلك تزودنا بوسيلة قيمة جدا لتقوية معلوماتنا عن الحركة الموجية عموما . وسوف نجد أن كثيرا من المبادىء والأفكار التى سوف نناقشها فيما يتعلق بالصوت ذات أهمية كبيرة أيضا فى دراستنا للضوء ولأنواع أخرى من الحركة الموجية .

١٥ - ١ منشأ الصوت

تعريف **يعرف الصوت** عادة بأنه أى اضطراب تضاغطى ينتقل فى المادة بحيث يسبب حركة طبلة الأذن ، ويؤدى بالتالى إلى الاحساس بالسمع .

ونحن نعتقد عامة أن الصوت عبارة عن موجة تضاغطية فى الهواء ، لأن الأذن توجد عادة فى حالة تلامس مع الهواء . ومع ذلك فإن الصوت يمكن أن يصل مباشرة إلى الأذن تحت الماء بواسطة اهتزاز الماء نفسه على طبلة الأذن . وعلى أى حال فإن الصوت هو اهتزاز مادى لايمكن أن يحدث الا فى وجود وسط ناقل للموجات . والمثال الشهير فى هذاالخصوص هو أننا لن نسمع دقات جرس كهربائى موجود داخل ناقوس مفرغ من الهواء بالرغم من اهتزاز الريشة وطرقها للجرس ، وذلك لعدم وجود مادة حول الجرس يمكنها أن تنقل الاهتزاز إلى خارج الناقوس .

هناك شيئان ضروريان لانبعاث الصوت وانتشاره . (١) لابد من وجود جسم يهتز بحيث يصدر الموجات التضاغطية . وسواء كان هذا الجسم وترا مهتزا أو الصندوق المصوت للكمان أو الاهتزاز الشديد بالقرب من سهم نارى مفرقع ، فإنْ هذا ذا أهمية ثانوية فقط . ذلك أن الصوت يصدر من الجسم المهتز فى كل حالة . (٢) لابد من وجود مادة لنقل الصوت . فوتر الكمان ، مثلاً ، ينقل الصوت إلى الهواء المحيط ، وهذا بدوره يحمل الاهتزاز إلى الأذن . أما إذا اهتز وتر الكمان فى الفراغ فإننا لن نسمعه لان الاهتزاز لاينتقل الينا من الوتر .

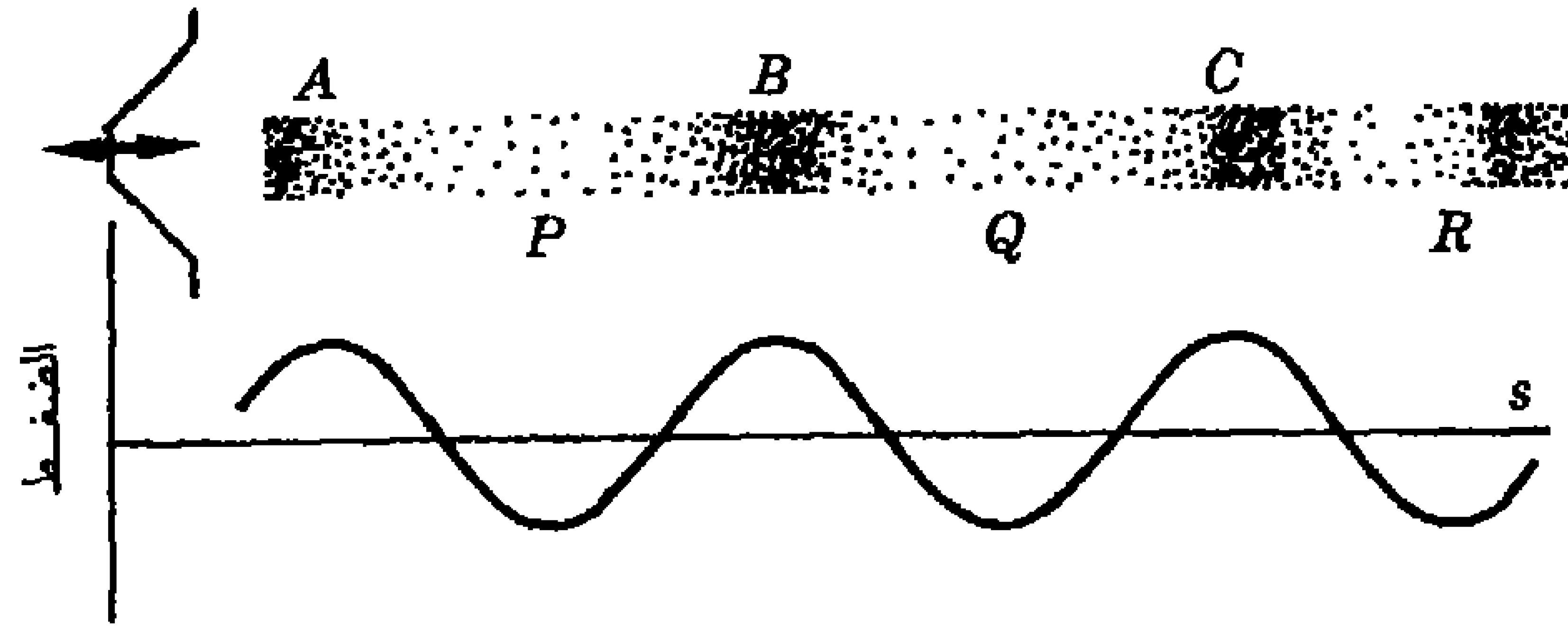


شكل (١٥ - ١)
يهتز غشاء الجهار المرن ذهابا وايابا ويبعث التضاغطات فى الهواء

١٥ - ٢ الموجات الصوتية فى الهواء

لنعتبر الآن عمل المجهار (مكبر الصوت) عند استخدامه فى اصدار الاصوات البسيطة . يتركب المجهار البسيط من لوح مخروطى الشكل من مادة مرنة يمكنه أن يتذبذب ذهابا وايابا تحت تأثير القوة الحافزة المتذبذبة F المؤثرة على مركزه كما هو مبين فى الشكل ١٥ - ١ .

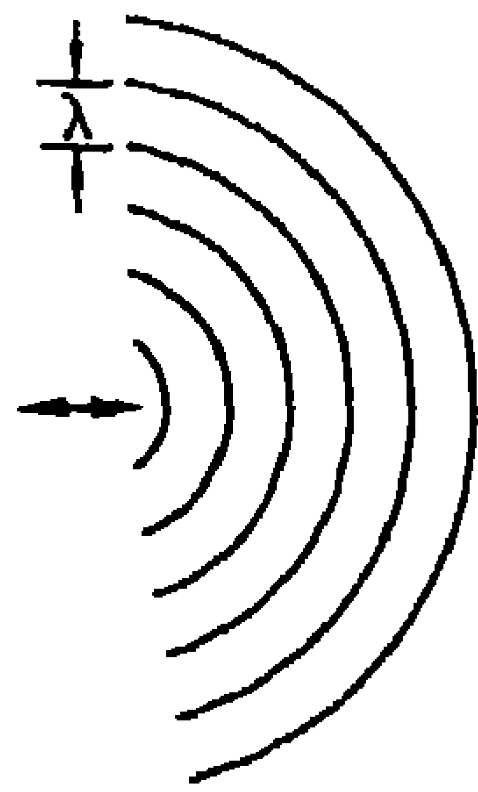
عندما يتحرك الغشاء إلى اليمين فإنه يضغط الهواء الملاصق له ، وبـذلك تنطلـق موجـة تضاغطية فى الهواء . وفى لحظة تالية يتحرك الغشاء إلى اليسار ، تاركا وراءه منطقة من الهواء ذات ضغط منخفض ، وهو مايسمى **بالتخلخل** . وهذا الاضطراب أيضا ينطلق من المجهار وينتشر فى الهواء . وبتكرار هذه العملية مرات كثيرة تنطلق من المجهار سلسلة من الموجات الضغطية التى تتكون من مناطق ذات ضغط مرتفع (التضاغطات) ومناطق ذات ضغط منخفض (التخلخلات) ، وهذا موضح فى الشكل ١٥ - ٢ .



شكل (١٥ – ٢)
تتكون الموجة الصوتية الصادرة من الجهار من مناطق ذات ضغط مرتفع واخرى ذات ضغط منخفض على التوالى . وعمليا يتغير P بما يساوى حوالى 0.01% فقط أو أقل .

توضح التضاغطات المنبعثة من الجهار فى الهواء بينما يتحرك نحو اليمين بالحروف A ، B ، C فى هذا الشكل . وعندما يتحرك الغشاء إلى اليسار فإنه يترك وراءه منطقة شبه مفرغة ، وبذلك تنطلق التخلخلات P ، Q ، R من الجهار . ويوضح الجزء السفلى من الشكل رسما بيانيا لتغير ضغط الهواء فى هذه الموجة الصوتية . لاحظ أن الخط المركزى لايمثل الضغط الصفرى ، ولكنه يكافىء قيمة متوسط الضغط الجوى . وتعتبر التخلخلات فى هذا الشكل مناطق ذات ضغط منخفض نوعا ما . ويفترض فى هذا الشكل أن الغشاء يهتز اهتزازا جيبيا . ويراعى أن التغيرات الحقيقية فى الضغط ، حتى للأصوات الجهيرة جدا ، لاتزيد عن حوالى 0.01% فقط من قيمة الضغط الجوى .

من المناسب احيانا أن نتحدث عن ازاحة جزيئات الهواء تحت تأثير الموجة الصوتية بدلا من الحديث عن الضغط فيها . ومن المؤكد أن جزيئات الهواء تتحرك ذهابا وإيابا بنفس الطريقة التى يتحرك بها الغشاء ذهابا وإيابا . ويلاحظ فى هذه الحالة أن الحركة الاهتزازية لجزيئات الهواء فى نفس اتجاه انتشار الموجة الصوتية ، وعليه فإن هذه الموجة موجة طولية . علاوة على ذلك ، حيث أن الهواء يهتز بنفس طريقة اهتزاز الغشاء ، يمكننا أن نتوقع إذن أن الرسم البيانى لازاحة الجزيئات سيكون مماثلا للرسم البيانى الموضح فى الشكل ١٥ – ٢ . وبالرغم من ذلك فإن أحد الرسمين سيكون مزاحا عن الآخر بمقدار ربع دورة . لماذا ؟



شكل (١٥ – ٣)
المسافة بين قمم الموجات (الجبهات الموجية) المتتالية ، والمنبعثة من الجهار ، تساوى الطول الموجى .

ترسم الموجات الصوتية المنبعثة من المصدر عادة كما هو موضح فى الشكل ١٥ – ٣ . وتمثل الخطوط المستمرة نقطة معينة على الموجات أثناء تحركها فى الهواء . وترسم هذه الخطوط (المسماة **جبهات الامواج**) عادة عند قمم الموجات . ويلاحظ أن المسافة بين جبهات الأمواج هذه هى المسافة من قمة موجة إلى القمة التى تليها أى الطول الموجى λ . ورغم أن معظم مكبرات الصوت تركز الموجات الصوتية بعض الشىء فى اتجاه معين ، فإن الأمواج تنتشر فى اتجاهات كثيرة من المصدر كما فى الشكل ١٥ – ٣ ، وتتحرك الموجات فى الهواء بسرعة الصوت .

١٥ – ٣ سرعة الصوت

الموجات الصوتية هى موجات تضاغطية فى المادة . ولقد رأينا فى الفصل السابق أن سرعة هذه الموجات فى الموائع تعطى بالمعادلة (١٤ – ٤) :

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}}$$

حيث d كثافة المائع ، E معامل الحجم ويعطى بالعلاقة :

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

حيث ΔV هو مقدار التغير فى الحجم V الذى يسببه تغير فى الضغط قدرة ΔP . لاحظ أن السوائل صعبة الانضغاط (E كبير) ولذلك فإن سرعة الصوت فيها v كبيرة . من هذا نرى أن الصوت يتحرك بسرعة أكبر من المواد الصعبة الانضغاط والمواد ذات الكثافة الصغيرة . وقد ذكرنا سابقا سرعة الصوت فى المواد المختلفة فى الجدول ١٤ – ١ .

تعتبر سرعة الصوت فى الهواء ثابتا ذا أهمية عملية خاصة ، وقيمتها عند درجة $0°C$ هى $331\ m/s$ أى $1086\ ft/s$. وتزداد قيمة سرعة الصوت فى الهواء بحوالى 0.60 m/s لكل ارتفاع فى درجة الحرارة مقداره $1°C$ وذلك بالقرب من درجات الحرارة العادية للهواء . يمكننا كذلك أن نعتبر ، كتقريب معقول ، أن سرعة الصوت فى الغازات المثالية لاتعتمد على ضغط الغاز .

١٥ – ٤ شدة وجهارة الاصوات

رأينا فى الفصل السابق أن المهتز الذى يرسل الموجة على وتر يبعث الطاقة أيضا مع هذه الموجة . وفى الحقيقة فإن جميع الموجات تحمل الطاقة معها ، ولاتستثنى الموجات الصوتية من ذلك . فمثلا ، يبعث الجهاز المبين فى الشكل ١٥ – ٣ بطاقة الموجة الصوتية ، وتنتشر هذه الطاقة فى اتجاه انتشار الموجة .

جدول ١٥ – ١

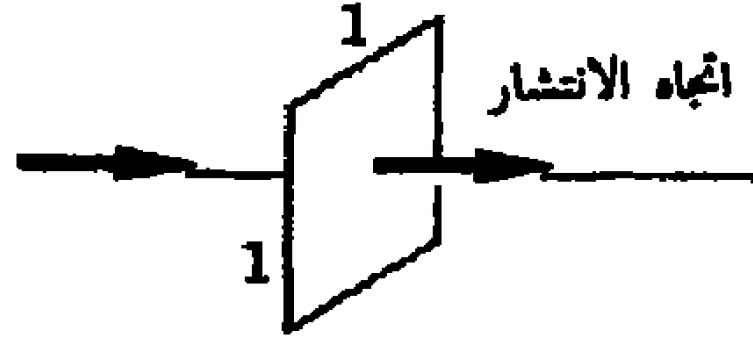
القيم التقريبية لشدة بعض الأصوات

نوع الصوت	شدة الصوت W/m^2	مستوى شدة الصوت dB
الصوت المسبب للألم	1	120
ثقابة الصخور التى تعمل بالهواء المضغوط أو مكنة البرشمة*	10^{-2}	100
طريق كثيف المرور*	10^{-5}	70
التخاطب العادى*	10^{-6}	60
الهمس المتوسط الارتفاع*	10^{-10}	20
حفيف الشجر*	10^{-11}	10
الصوت المسموع بالكاد	10^{-12}	0

* إذا كان الشخص قريبا من مصدر الصوت

لنفرض أن الموجة الصوتية تتحرك فى اتجاه الانتشار المبين فى الشكل ١٥ — ٤ . ونحن نعرف شدة الموجة بدلالة الطاقة التى تحملها هذه الموجة . ولكى نتحرى الدقة ، سنرسم مساحة قدرها الوحدة عمودية على اتجاه الانتشار المبين . وعندئذ سوف نعرف شدة الموجة بأنها الطاقة التى تحملها الموجة فى الثانية عبر وحدة المساحات العمودية على اتجاه انتشار الموجة . وحيث أن الشدة هى الطاقة فى الثانية ، إذن **شدة الصوت هى القدرة المارة خلال وحدة مساحات عمودية على اتجاه انتشار الموجة** . ووحدات شدة الصوت هى الواط لكل متر مربع . ويوضح الجدول ١٥ — ١ شدة بعض الأصوات . لاحظ أن مدى شدة الصوت الذى تستطيع الأذن أن تسمعه واسع جدا . ويبين هذا أن الأذن جهاز قياس مذهل الحساسية .

تعريف



شكل (١٥ — ٤)
تقاس شدة الصوت بكمية الطاقة المارة خلال وحدة المساحات فى الثانية . ويجب أن تكون هذه المساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة .

للتعبير عن طريقة استجابة الأذن للأصوات بطريقة أفضل يستخدم عادة مقياس شدة الصوت ، أو مقياس الديسيبل ، المبنى على قوى الرقم 10 والموضح فى الجدول ١٥ — ٢ .

جدول ١٥ — ٢
مقياس الديسيبل*

مستوى شدة الصوت dB	شدة الصوت W/m^2
0	10^{-12}
10	10^{-11}
20	10^{-10}
30	10^{-9}
⋮	⋮
110	10^{-1}
120	1
130	10

* 10 dB = 1 B(bel) . وتسمى الوحدة« بل » بهذا الاسم نسبة إلى الكسندر جراهام بل مخترع التليفون .

لاحظ أن الحد الأدنى لشدة الصوت المسموع بالكاد للأذن المتوسطة أى (10^{-12} W/m^2) هو الصفر فى مقياس الديسيبل . وكلما ازدادت شدة الصوت 10 أضعاف يرتفع مستوي شدة الصوت بالديسيبل بمقدار 10 وحدات ، وقد وجد أن الأذن تحكم على الاصوات طبقا لمقياس الديسيبل . فمثلا ، يعتبر الشخص أن جهارة الصوت قد تضاعفت إذا ارتفع مستوى الجهارة حوالى عشرة ديسيبل .

يمكننا تعريف مقياس الديسيبل فى صورة رياضية كمايلى :

مقياس الديسيبل	مستوى شدة الصوت بوحدة الـ dB $= 10\log\frac{I}{I_0}$ (١٥ – ١)

حيث I شدة الصوت بالواط لكل متر مربع، $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$، وهى كمية اختيارية تعتبر كمستوى مرجعى . وكما نرى فإن الأذن تستجيب للوغاريتم شدة الصوت . ولهذا السبب يقال عادة أن الأذن جهاز كشف لوغاريتمى . من المهم أيضا أن نعلم أن العين جهاز كشف لوغاريتمى كذلك ، ولكنه حساس للموجات الضوئية وليس الصوتية بالطبع .

مثال توضيحى ١٥ – ١ : أوجد مستوى شدة الصوت بالديسيبل لموجة صوتية شدتها 10^{-5} W/m² .

طريقة الحل . بالتعويض عن $I = 10^{-5}$ W/m² ، $I_0 = 10^{-12}$ W/m² فى المعادلة (١٥ – ١) نجد أن :

مستوى شدة الصوت بالوحدة dB $= 10\log\frac{10^{-5}}{10^{-12}} = 10\log 10^7 = (10)(7) = 70$ dB

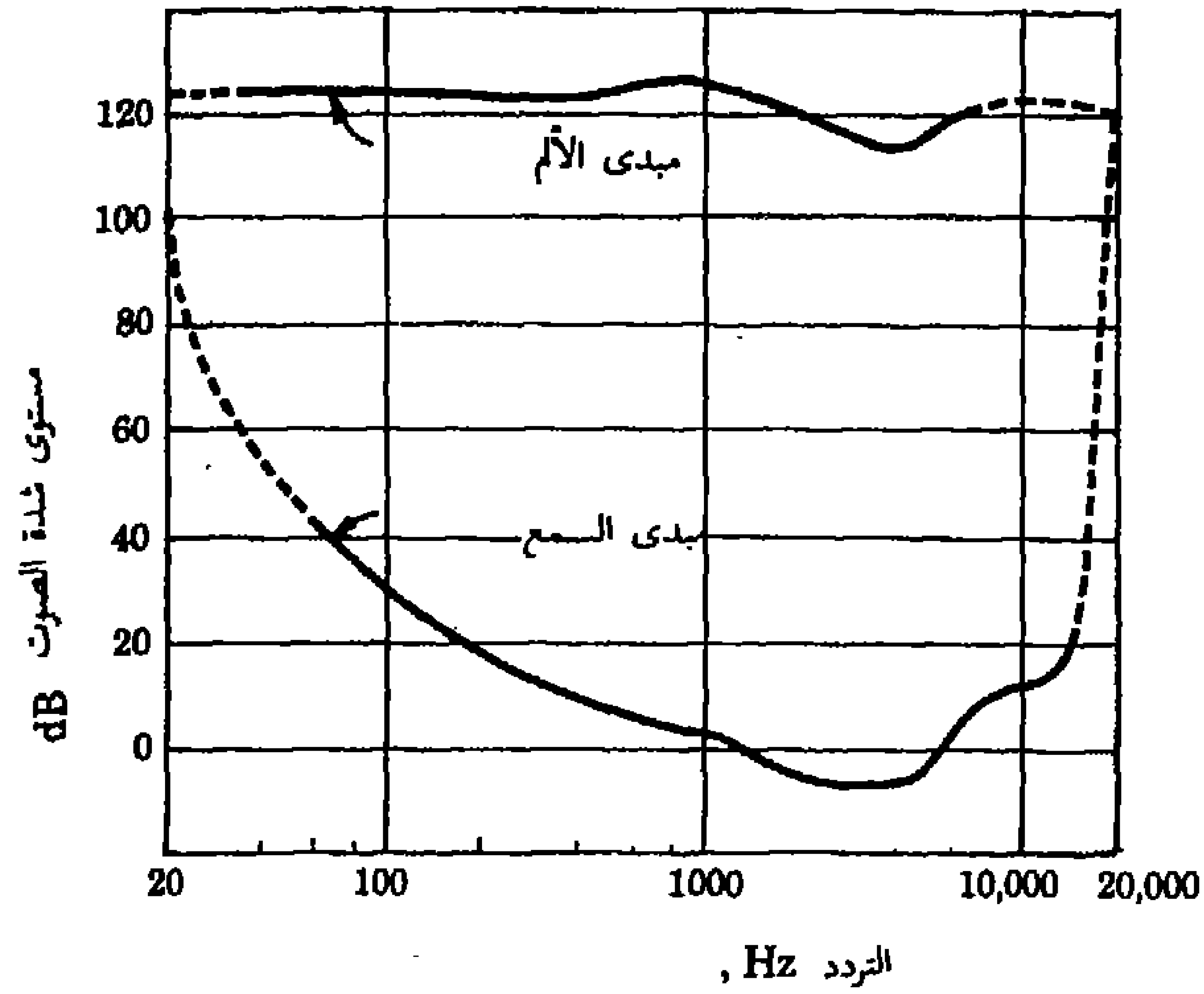
١٥ – ٥ الاستجابة الترددية للأذن

يختلف الناس فى مقدرتهم على سماع الأصوات . ونحن نعلم جميعا أن سمع بعض الناس يضعف لسبب من الأسباب ، وعندئذ تقل حساسية آذانهم بدرجة كبيرة عن الشخص العادى . ومع ذلك فإن معظم الناس يتفقون فى شدة الصوت الذى يمكن أن يسمع بالكاد ، وكذلك فى جهارة الصوت الذى يسبب الألم . يمكننا أذن وضع حدود متوسطة لقدرة الأذن البشرية العادية . والحد الأدنى هو شدة الصوت المسموع بالكاد ، أما الحد الأقصى فإنه شدة الصوت الذى يسبب الألم للأذن .

ترددات الصوت المسموع

لايستطيع معظم الناس أن يسمعوا الموجات التضاغطية فى الهواء والتى يزيد ترددها عن حوالى *20,000 Hz* . وتسمى الموجات التى يزيد ترددها عن هذه القيمة **بالموجات فوق السمعية** – بمعنى الصوت « الأعلى » أو « الأكبر » من ناحية التردد . بالمثل لاتستطيع الأذن البشرية أن تسمع الأصوات التى يقل ترددها عن حد معين ، وهو حوالى 20 Hz . وتصل حساسية الأذن إلى أقصى قيمة فى مدى التردد القريب من حوالى 3000 Hz . وعند الترددات التى تختلف عن ذلك لابد أن يكون الصوت أكبر فى الشدة لكى يمكن سماعه ، وهذا التغير فى حساسية الأذن مع التردد موضح فى الشكل ١٥ – ٥ .

نرى من هذا الشكل أن الأذن العادية غير حساسة إلى حد بعيد للترددات التى تزيد عن حوالى *15,000 Hz*، والتى تقل عن حوالى *30 Hz* . أما الأصوات



شكل (١٥ - ٥)
تستطيع الأذن العادية أن تسمع الأصوات التى تقع شدتها فوق المنحنى السفلى فى الشكل .

التى يقع ترددها خارج هذا المدى فيمكن أن تسمع فقط إذا كانت شدة الصوت عالية جدا . لاحظ أن شدة الصوت التى تسبب الألم لاتتغير كثيرا مع التردد .

هناك بعض الناس الذين يعانون ضعفا غريبا إلى حد ما فى السمع ، ولا يعلمون هم أنفسهم بذلك ، فهؤلاء الناس لايمكنهم سماع الصوت الذى يزيد تردده عن حوالى 6000 Hz تقريبا . وحيث أن معظم الأصوات التى نسمعها تتكون ، على الأقل جزئيا ، من ترددات أقل من هذه القيمة ، فإن هؤلاء الناس مازالو قادرين على سماع الاصوات المسموعة لغيرهم . ومع ذلك فإن نوع الصوت الذى يسمعونه يختلف تماما عن نوع الصوت الذى يسمعه الشخص العادى . ويعتبر نوع ودرجة الصوت خاصيتين معقدتين وغير موضوعيتين إلى حد كبير ، وسوف نناقشهما فى الجزء التالى .

١٥ - ٦ درجة ونوع الصوت

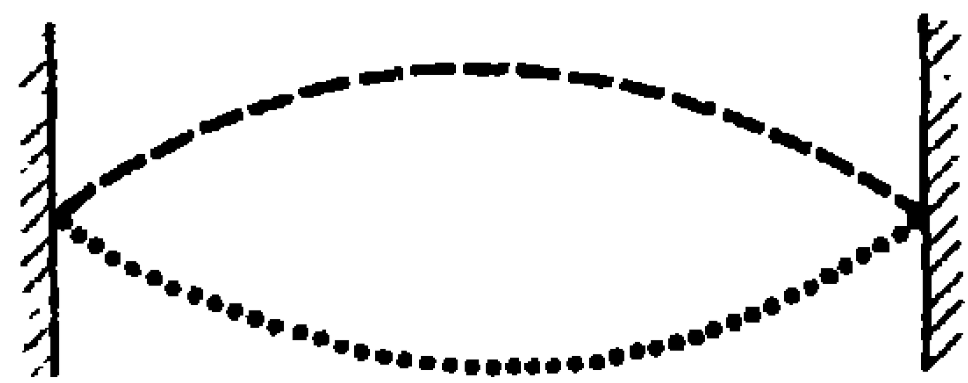
يعمل الجهار عالى الجودة بواسطة مذبذب كهربائى يولد فلطية جيبية ، ولهذا فإن الصوت الصادر من الجهار سيكون على شكل موجة جيبية نقية تقريبا ذات تردد يساوى تردد المذبذب . ويستطيع أى شخص غير أصم للطبقات الصوتية أن يقارن درجة هذا الصوت بدرجة صوت آخر . وإذا رفعنا تردد المذبذب الذى يقوم بتشغيل غشاء الجهار فإن السامع سوف يقرر حالا أن درجة الصوت الجديد أعلى من درجة الصوت الأول . وفى هاتين الحالتين تعتبر درجة الصوت مرادفا لتردده .

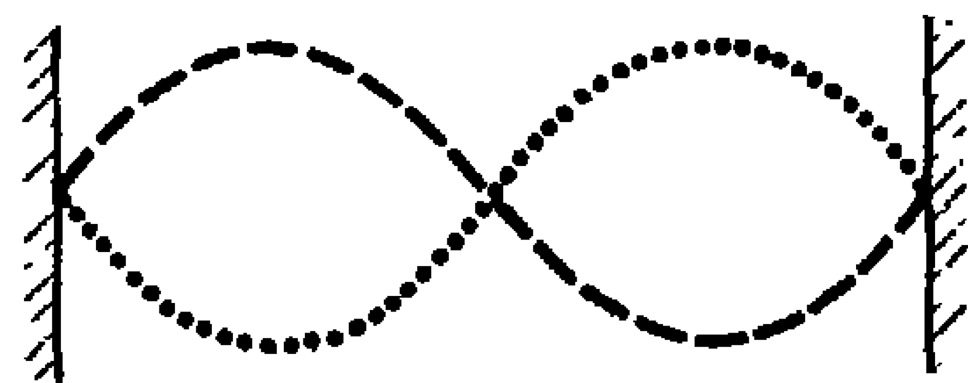
ولكن المثال السابق ليس مثالا عاما . فإذا نقر وتر الكمان . مثلا ، بالاصبع أو القوس فإن الموجة الصوتية الصادرة لن تكون موجة جيبية نقية . وهذا واضح تماما

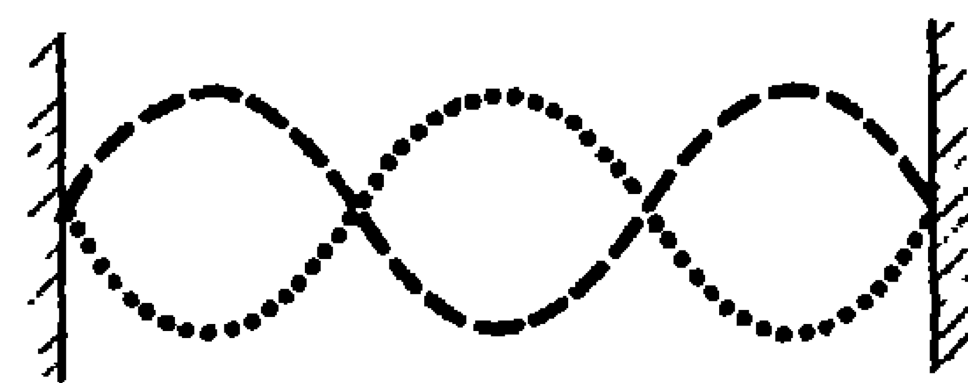
لأى شخص يقارن النغمة التى يحصل عليها عازف ماهر من الكمان بتلك التى يحصل عليها عازف مبتدىء . ففى الحالة الأولى تكون النغمة كاملة وشجية ، بينما يحصل العازف المبتدىء فى الحالة الثانية على أصوات ذات صريف خشنة مثيرة للأعصاب من نفس الوتر . ويقال عندئذ أن نوع النغمة مختلف فى الحالتين .

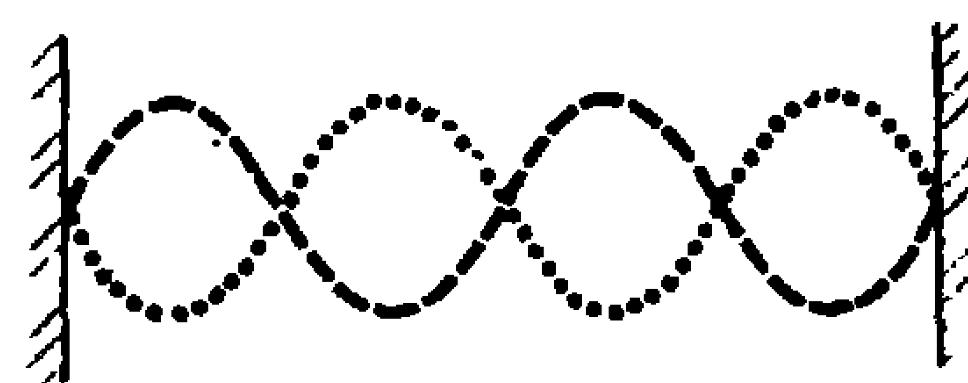
وكما رأينا فى الفصل الرابع عشر ، يمكن أن يهتز الوتر رنينيا بأكثر من طريقة ، ويوضح الشكل ١٥ – ٦ بعض أنماط الاهتزاز البسيطة للوتر، وتسمى هذه الانماط الاهتزازية كما هو موضح فى الشكل . وحيث أن النسبة بين الاطوال الموجية فى الحالات المبينة هى $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4}$. وكذلك حيث أن $f = v/\lambda$ فإن النسبة بين ترددات الاهتزاز هى $1:2:3:4$ كما هو موضح فى الشكل .

ومع ذلك فإن من الصعب أن نجعل الوتر يهتز كما هو موضح فى كل من الانماط المبينة فى الشكل ١٥ – ٦ بالضبط . وبدلا من ذلك ، إذا مرر القوس بالقرب من احدى نهايتى الوتر ، كما هى الحال عادة ، فإن التوافقية الأولى لاتظهر وحدها ، بل يصاحبها عدد من التوافقيات الاخرى فى نفس الوقت . وعندئذ يهتز الوتر فى الواقع بعدة طرق فى نفس الوقت . ولايجاد الاهتزاز الناتج يجب جمع موجات مختلف التوافقيات التى تظهر . وهناك بالطبع نسب معينة بين شدة مختلف المركبات ، إذ تكون بعض المركبات أكبر شدة من الأخرى .







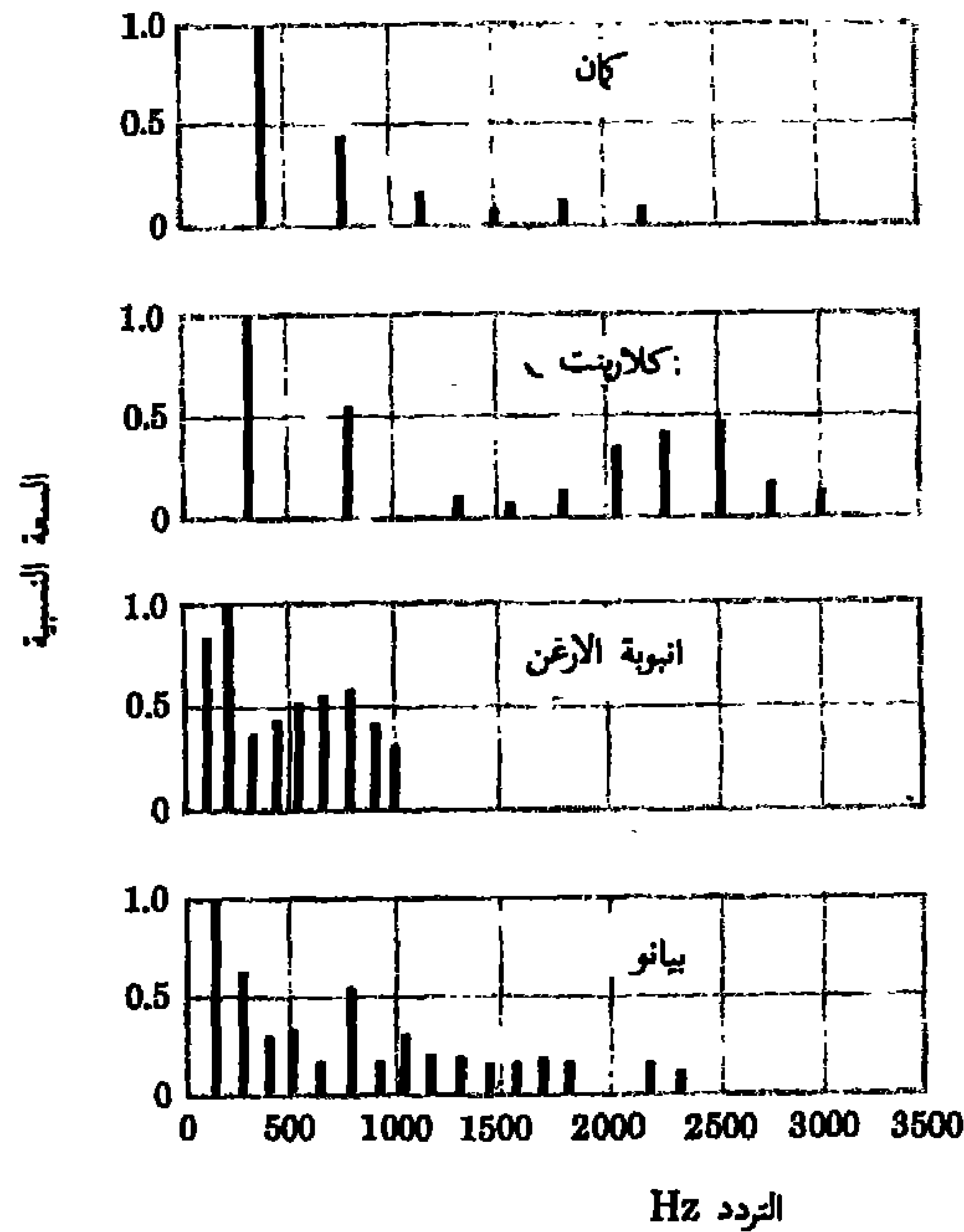


شكل (١٥ – ٦)
ابسط أربعة انماط للحركة فى حالة الموجات المستقرة فى الوتر .

يوضح الشكل ١٥ – ٧ مثالا نموذجيا لاهتزاز وتر الكمان ، وتوضح سعة الاهتزاز لنغمات التوافقيات فى هذا الشكل بطول الأعمدة الرأسية . وفى هذه الحالة تعتبر جميع التوافقيات ضعيفة نسبيا باستثناء أول توافقيتين . ولكن من الواضح أن النغمة التى تسمعها الأذن ستختلف عن أى من التوافقية الأولى أو الثانية وحدها .

يبين فى الشكل ١٥ – ٧ أيضا الاشكال البيانية المماثلة للاصوات الصادرة من بعض الآلات الموسيقية الاخرى . وواضح من هذا الشكل أن وتر البيانو يعطى عددا أكبر من التوافقيات بالمقارنة بوتر الكمان . وربما يكون ذلك راجعا إلى الطريقة المعقدة التى تؤدى إلى اهتزاز وتر البيانو . ففى حالة الكمان يمرر العازف القوس على الوتر ببطء وبطريقة منتظمة ، أما فى حالة البيانو فإن الوتر يهتز تحت تأثير ضربة المطرقة .

يعتمد نوع الصوت أو نغمته على عدد وطبيعة التوافقيات الموجودة فى هذا الصوت . فإذا كانت جميع الأصوات موجات جيبية نقية فإن هذا سوف يفقد الاصوات قدرا كبيرا من تنوعها . وعندئذ ستكون نغمة جميع الأصوات البشرية واحدة.وسيعرف صوت الانسان فى هذه الحالة بالتردد المميز فى مقام الصوت أو ارتفاعه . كذلك فإن قدرا كبيرا من جمال الموسيقى سوف يفقد إذا كانت أنواع جميع الاصوات واحدة .



شكل (١٥ – ٧)
لكل آلة موسيقية نغمة تختلف فى نوعها عن نغمات الآلات الأخرى . ويوضح الشكل الترددات الموجودة فى النغمة والسعة النسبية لها . لاحظ أن التوافقيات ليست دائما بسيطة كما فى حالة الوتر .

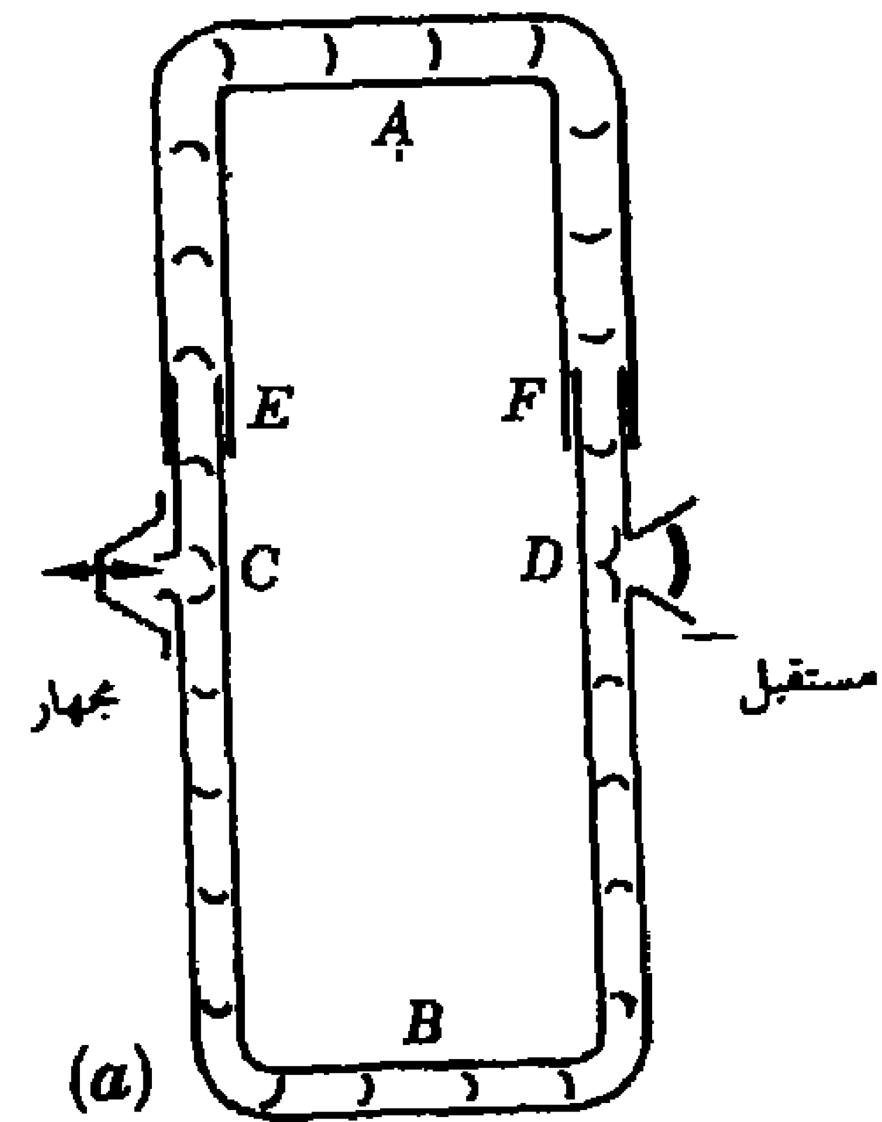
ليس من السهل دائما تحديد درجة الصوت إذا كان هذا الصوت معقدا كما هو موضح بالنسبة لصوت البيانو أو حتى الكلارينت ، إذ لا يمكننا اعتبار درجة الصوت مرادفا لتردده ، لأن الصوت يحتوى على عدة موجات مختلفة فى التردد ومتساوية تقريبا فى السعة . وفى هذه الحالات يكون من الصعب علينا أن نضاهى النغمات بدقة . ولهذا السبب ليس من الغريب مطلقا لمغن غير متمرس يغنى نغمة ترددها ضعف النغمة الاساسية للكمان ألا يلاحظ اختلاف النغمتين ، بالاضافة إلى ذلك فإن كثيرا من المستمعين لن يلاحظوا أن المغنى لايردد النغمة الصحيحة .

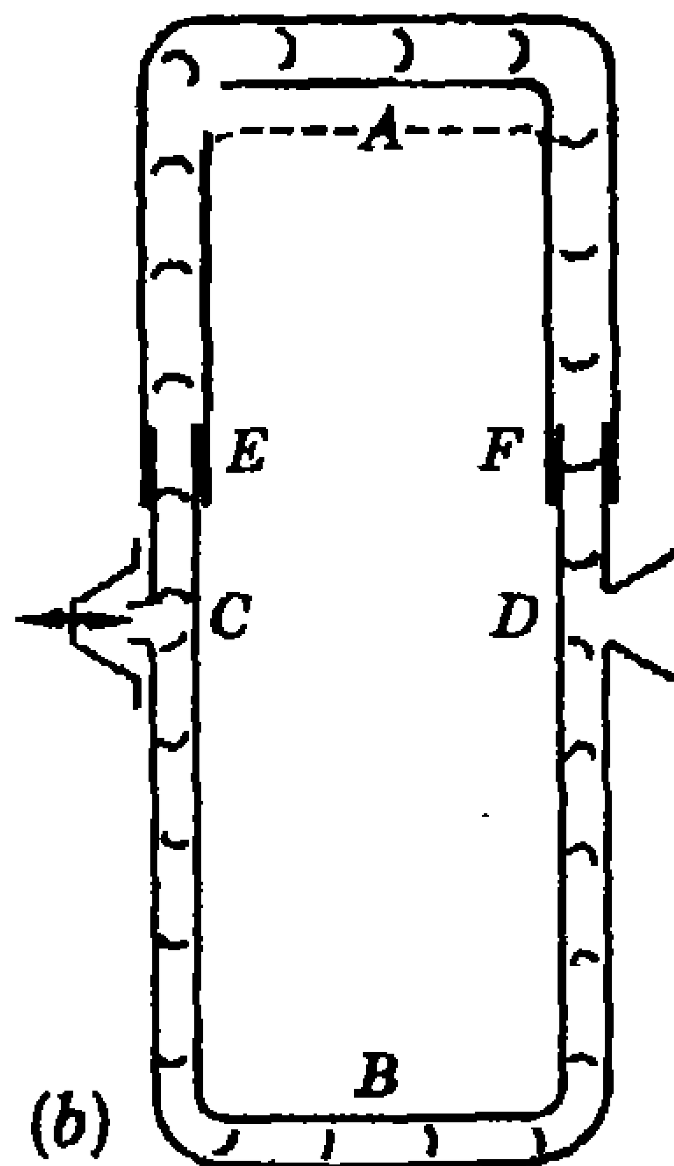
١٥ – ٧ تداخل الموجات الصوتية

لنفرض أن لدينا نظاما أنبوبيا كالمبين فى الشكل ١٥ – ٨ . إذا ارسلت موجة جيبية من الجهة اليسرى للنظام بواسطة جهاز فإن الصوت سينقسم إلى جزءين ، ويمر نصف شدة الصوت خلال الجزء A ، بينما يمر النصف الآخر خلال الجزء السفلى . وعندئذ يمكننا أن نقول أن كلا من الأنبوبتين تحمل نصف كمية الصوت ، وهذا الصوت عبارة عن حركة موجية فى الهواء تتكون من سلسلة من التضاغطات والتخلخلات .

وفى النهاية تتحد الموجتان الصوتيتان عند المخرج فى الجزء الأيمن ، أى عند النقطة D ، حيث يوضع كاشف صوتى كالأذن أو الميكروفون . وعندئذ سيلاحظ أن شدة الصوت عند النقطة D يمكن أن تكون كبيرة أو صغيرة حسب وضع الأنبوبة المنزلقة EAF . بالاضافة إلى ذلك ، إذا حركنا الأنبوبة A إلى أعلى ببطء ، فإن شدة الصوت عند D ستصبح صغيرة وكبيرة على التتابع . وسندرس الآن اسباب ظاهرة التداخل هذه .

شكل (١٥ – ٨)
تنقسم الموجة الصادرة من الجهاز إلى جزءين . وعندما يتحد هذان الجزءان عند D ، قد نسمع صوتا جهيرا أو ضعيفا ، ويعتمد ذلك على الفرق بين طولى المسارين اللذين يقطعهما نصفى الموجة .

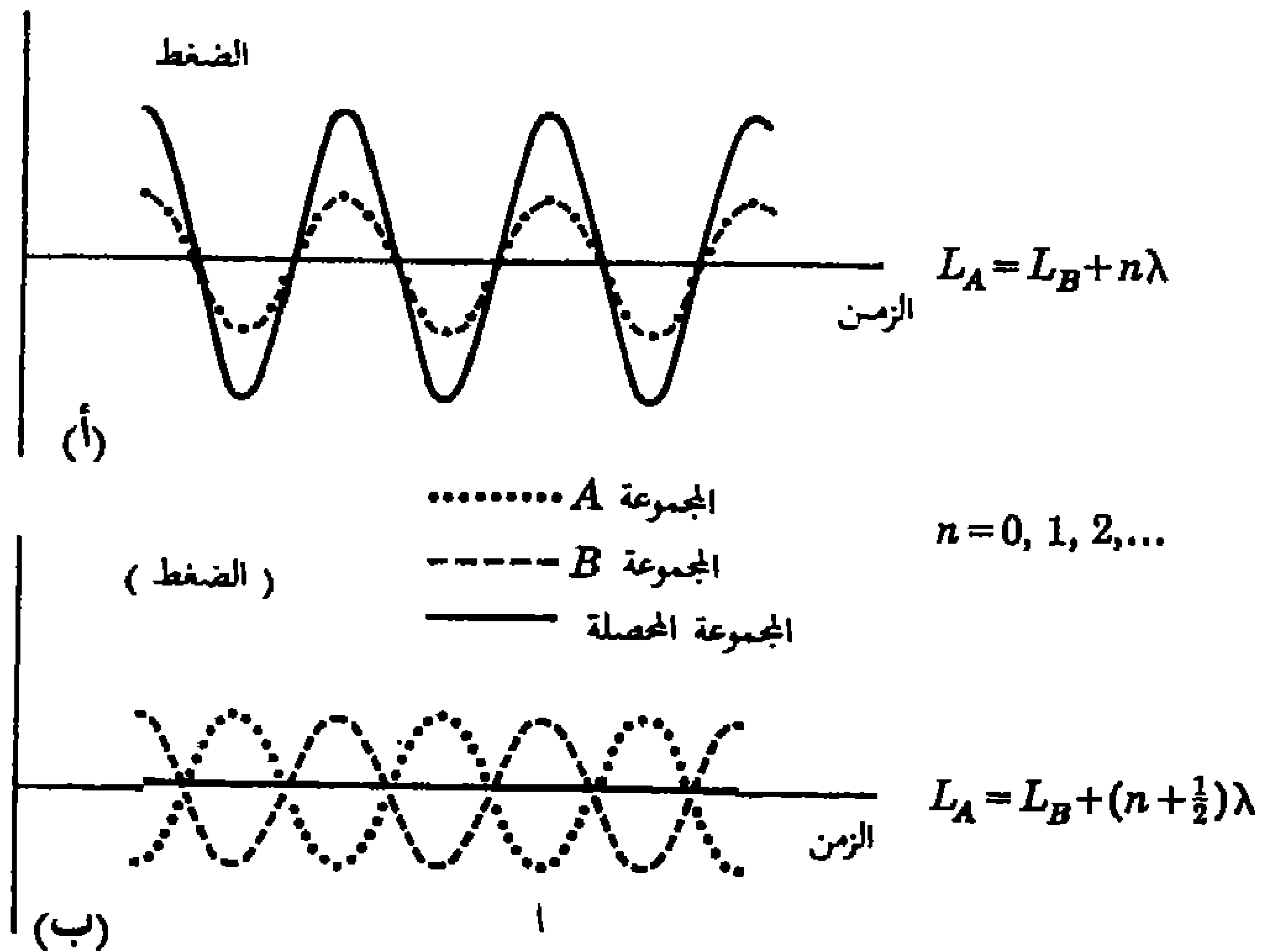




عندما يحدث تضاغط فى الهواء نتيجة لحركة غشاء الجهاز إلى اليمين ، تتكون منطقة ذات ضغط مرتفع فى الأنبوبة عند النقطة C . وهذه المنطقة ذات الضغط المرتفع ، أى التضاغط ، تسبب تحرك تضاغطين فى كلا الأنبوبتين . واحد تجاه A والآخر تجاه B – ويمكننا أن نقول أن التضاغط الأصلى فى مدخل الأنبوبة قد انقسم إلى جزءين متساويين ، وأن احدهما يتحرك إلى أعلى تجاه A ، بينما يتحرك الآخر إلى أسفل تجاه B . وحيث أن التضاغط يتحرك فى الأنبوبة بسرعة الصوت ، فإن هذين التضاغطتين سيصلان إلى النقطة D فى نفس اللحظة ، بشرط أن يكون طول الأنبوبة A أى L_A ، مساويا لطول الأنبوبة B أى L_B . عندئذ يتحد هذان التضاغطان مرة أخرى عند D ليكونا التضاغط الأصلى الذى يخرج من الأنبوبة عند D .

وبالطبع فإن الجهاز يصدر صوتا نقيا ، أى موجة جيبية ، مكونا من تضاغطات وتخلخلات متتابعة . ومع ذلك ، فإذا كان $L_A = L_B$ ، فإن جزءى التضاغط الأصلى سوف يتقابلا دائما عند D . وهذا صحيح أيضا بالنسبة لجزءى كل تخلخل . ومن ثم تتكون عند النقطة D تضاغطات وتخلخلات مماثلة تماما للتضاغطات والتخلخلات الاصلية عند C ، وعليه فإن الصوت يكون جهيرا . وهذا موضح فى اشكل ١٥ – ٩ أ حيث رسم الضغط فى كل من الموجتين A ، B عند النقطة D كدالة للزمن ، ثم جمع هذان الضغطان لنحصل على الضغط الكلى عند النقطة D كدالة للزمن .

من ناحية أخرى ، لنفرض أن طول الجزء A من الأنبوبة أكبر قليلا من طول الجزء B . عندئذ سيصل نصف التضاغط الذى يتحرك فى A إلى النقطة D متأخرا قليلا عن نصف التضاغط الذى يتحرك فى الجزء B ، لأن المسافة التى يجب أن يقطعها



شكل (١٥ – ٩)
قد تقوى الموجتان A ، B كل منهما الاخرى . ويعتمد ذلك على فرق الطور بينهما .

أكبر . فإذا كان L_A اكبر من L_B بمقدار نصف الطول الموجى ، فإن الموجة A ستكون متأخرة عن الموجة B بمقدار نصف الطول الموجى عندما تلتقيان عند النقطة D . وعليه فإن تضاغطا من الموجة A سوف يلتقى مع تخلخل من الموجة B عند النقطة D . وحيث أن التضاغط يؤدى إلى زيادة الضغط عند النقطة D ، بينما يؤدى التخلخل إلى نقص الضغط عند النقطة D ، فإن الموجتين سوف تلاشى كل منهما الأخرى ويظل الضغط دون تغير . ونتيجة لذلك لن يسمع أى صوت عند النقطة D ، وهذا موضح فى الشكل ١٥ — ٩ ب .

عندما تكون موجة معينة متأخرة عن موجة أخرى بمقدار نصف الطول الموجى ، يقال فى هذه الحالة أن الموجتين متفاوتتى الطور بمقدار نصف الطول الموجى ، أو $180°$ ، احداهما عن الأخرى . وهذا الاصطلاح ، $180°$ ، مبنى على أساس أن الاهتزاز يماثل فى كثير من الوجوه جسيما يتحرك فى دائرة كما وضحنا فى الفصل الثالث عشر . وعليه فإن الاهتزازة الكاملة تكافىء دورة كاملة واحدة حول الدائرة ، أى $360°$ ، ومن ثم فإن تأخيرا قدره $\frac{1}{2}\lambda$ يكافىء $180°$. بالمثل $90°$ تكافى $\frac{1}{4}\lambda$ وهكذا .

والآن ، عندما يزداد L_A أكثر من ذلك بتحريك الأنبوبة A إلى أعلى ، سوف يزداد بالتالى تأخر الموجة A عن الموجة B . وعندما يصبح L_A أكبر من L_B بطول موجى كامل واحد ، فإن قمة من الموجة A سوف تصل إلى D فى نفس اللحظة مع قمة من الموجة B . وبالرغم من أن هاتين القمتين لم تبدءا سويا من النقطة C ، فإن قمة الموجة A ستصل قبل قمة الموجة B بتضاغط كامل ، ولكن هذا ليس هاما عندما تصل القمتان إلى D . ومرة ثانية ستظهر الموجة كما فى الشكل ١٥ — ٩ أ ، وعليه فإن شدة الصوت عند D ستعود إلى قيمتها الاصلية .

شروط التداخل الائتلافى والبناء

بالمثل ، إذا ازداد L_A حتى أصبح أكبر من L_B بمقدار $1\frac{1}{2}\lambda$ ، فإن الحالة المبينة فى الشكل ١٥ — ٩ ب سوف تحدث ثانية ، ولن يسمع الصوت عند D . علاوة على ذلك من الواضح ان الصوت لن يسمع عند D متى كان $L_A = L_B + (n + \frac{1}{2})\lambda$ ، حيث n أى عدد صحيح أو صفر . وعندما تلاشى الموجتان كل منهما الاخرى تماما بهذه الطريقة ، يقال أن هناك **تداخلا ائتلافيا كاملا** . وواضح أيضا أن تقوية كل من الموجتين للاخرى ، أى التداخل البناء ، تحدث إذا كان $L_A = L_B + n\lambda$ ، حيث n أى عدد صحيح أو صفر . وبالطبع فإن هذين النوعين من التداخل يحدثان أيضا إذا كان L_B أكبر من L_A .

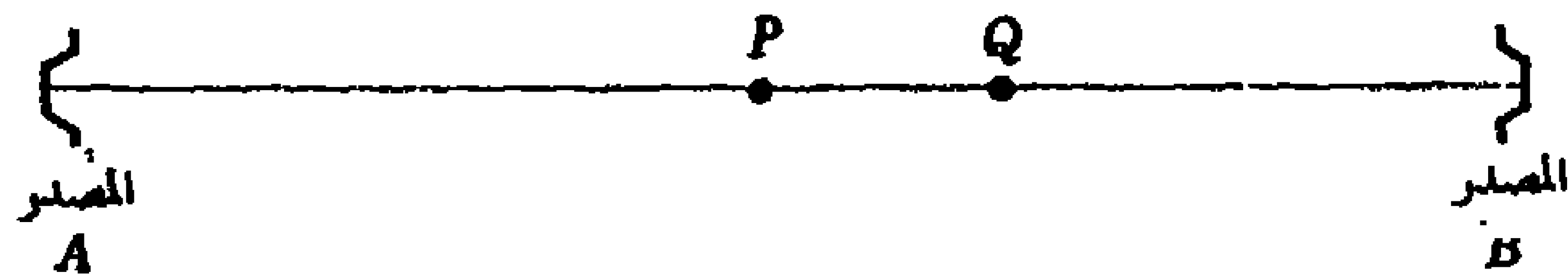
ليس من الضرورى أن يكون لدينا مجموعة انابيب لكى يحدث التداخل ، فكل مانحتاجه هو الحصول على موجتين متماثلتين تماما فى التردد والشكل . وعندما تتحد هاتان الموجتان بعد أن تقطعا مسارين مختلفين فإنهما سوف تتداخلان احداهما مع الأخرى . وسنعطى مثالا آخر للتداخل فى المثال التوضيحى التالى . وسوف نرى مؤخرا فى هذا الكتاب أن تداخل الموجات الضوئية ذو أهمية كبيرة .

مثال توضيحى ١٥ - ٢ : مصدران صوتيان متماثلان A ، B يصدران موجتين متماثلتين تجاه كل منهما الآخر كما هو مبين فى الشكل ١٥ - ١٠ . ضبط المصدران بحيث يبعثان بالقمم الموجية فى نفس اللحظة ، وبحيث كان الطول الموجى لكل من الموجتين $\lambda = 70$ cm . وقد وجد أن الصوت يكون جهيرا فى منتصف المسافة بينهما ، أى عند النقطة P . وقد لوحظ كذلك أننا إذا تحركنا من P تجاه المصدر B ، فإن شدة الصوت تقل إلى الصفر تقريبا عند النقطة Q ، ثم تزداد ثانية عندما نتحرك فى نفس الاتجاه مبتعدين عن Q . ماهو البعد بين النقطتين P ، Q ؟

طريقة الحل . من السهل أن نفسر لماذا يكون الصوت قويا عند P ، والسبب فى ذلك هو أن هذه النقطة تقع على نفس البعد من المصدرين ، ولذلك تصل القمم من A و B إلى هذه النقطة فى نفس اللحظة . أى أن P هى نقطة تداخل بناء .

من الواضح أيضا أن الموجتين الآتيتين من المصدرين تلاشى كل منهما الاخرى عند Q . وهذا يحدث عندما تكون المسافة بين P ، Q مساوية لربع الطول الموجى ، أى عندما يكون $\overline{PQ} = \lambda/4$. وفى هذه الحالة يجب أن تقطع الموجة الصادرة من A مسافة قدرها $\lambda/4$ بعد P ، بينما يجب أن تقطع الموجة الصادرة من B مسافة أقل من المسافة التى تقطعها لتصل إلى النقطة P بمقدار $\lambda/4$. نتيجة لذلك تصل الموجة الآتية من B إلى النقطة Q قبل الموجة الآتية من A بمقدار $\lambda/2 = \lambda/4 + \lambda/4$. وعليه فعندالنقطة Q تلتقى قمة B مع قرار من A . إذن ، تلاشى كل من الموجتين الاخرى عند Q ، ولذلك يسمع صوت ضعيف جدا فى هذه النقطة .

نستنتج من ذلك أن المسافة بين النقطة بين النقطتين P ، Q هى $\lambda/4$. وحيث أن $\lambda = 70$ cm . إذن $\overline{PQ} = 17.5$ cm .



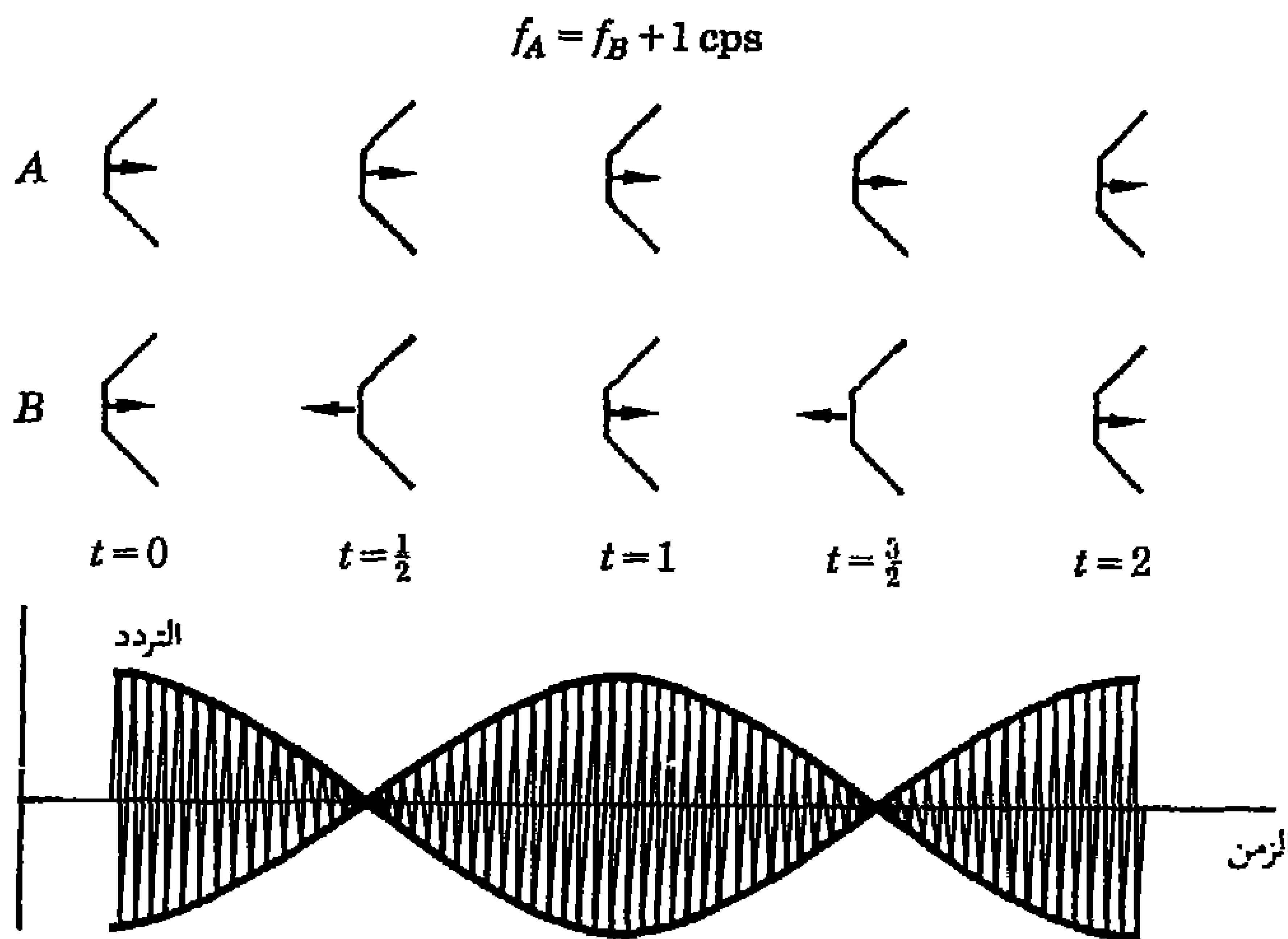
شكل (١٥ - ١٠)
يسمع صوت قوى عند النقطة P ، بينما يكون الصوت ضعيفا جدا عند Q . اشرح سبب ذلك .

١٥ - ٨ الضربات

تضبط أوتار البيانو بمقارنة النغمات الصادرة منها بنغمات شوك رنانة قياسية معلومة التردد . وعندما يقوم الموسيقيون بضبط أحد أوتار البيانو فإنهم لا ينصتون ببساطة إلى نغمة الوتر ليروا ما إذا كانت مماثلة لنغمة الشوكة الرنانة المستخدمة فى المقارنة ، بل يستخدمون طريقة أكثر دقة للحكم على مدى ضبط الوتر ، وهى أن ينصتوا إلى **الضربات** بين صوتى الوتر والشوكة الرنانة . وهذه طريقة دقيقة جدا للحصول على اتفاق فى التردد بين الجسمين المهتزين وتستخدم على نطاق واسع لهذا الغرض . وسنشرح الآن ظاهرة الضربات بين الصوتين الصادرين من جسمين مهتزين متناغمين تقريبا .

لنفرض أن جسمين مهتزين A ، B - كالجهازين المبينين فى الشكل ١٥ - ١١ مثلا - يهتزان بترددين يختلف أحدهما عن الآخر اختلافا طفيفا . اعتبر ما يحدث إذا كان المصدر A يهتز بتردد قدره 1000 cps ، بينما يهتز المصدر B بتردد قدره $f = 999$ cps . وسنفرض أيضا أن الجهازين متفقا الطور فى اللحظة $t = 0$ أى أنهما يبعثان تضاغطين فى هذه اللحظة ، كما هو مبين فى الشكل . فإذا كانت الأذن تقع على نفس المسافة من كل من الجهازين فإن التضاغطين سوف يصلان إلى الأذن فى نفس اللحظة ، ولذلك فإنها تسمع تضاغطا كبيرا .

وبمرور الزمن سوف يبدأ الجهاز B ، الذى يهتز بتردد أصغر قليلا من الجهاز A ، فى التأخر عن A .. فبعد $\frac{1}{2}$ s سيكون الجهاز A قد اهتز 500.00 مرة ، وبذلك فإنه سوف يبعث تضاغطا فى هذه اللحظة ، كما هو مبين فى الشكل ١٥ - ١١ . أما



شكل (١٥ - ١١)
تحدث الضربات عند اهتزاز مصدرين متشابهين بترددين مختلفين اختلافا صغيرا .

الجهاز B فسيكون قد اهتز 499.50 مرة فقط ، أى أنه سيكون متأخرا عن الجهاز A بمقدار نصف دورة تماما ، ولذلك فإنه سوف يبعث تخلخلا فى هذه اللحظة كما هو مبين . وعليه فإن تضاغطا من A وتخلخلا من B سوف يصلان إلى الأذن فى نفس اللحظة . ونتيجة لذلك سوف تلاشى كل من الموجتين الاخرى تماما ، ومن ثم فلن يسمع أى صوت فى هذه اللحظة .

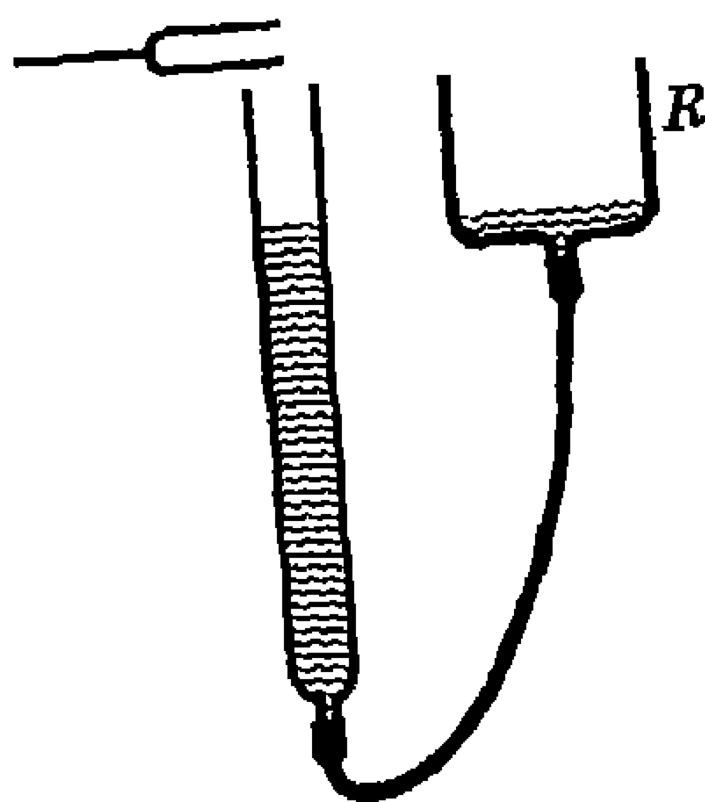
وباستمرار الزمن فى المرور يستمر تأخر الجهاز B عن A . وبعد 1 s سيكون B قد اهتز 999 مرة تماما ، بينما سيكون A قد اهتز 1000 مرة تماما . أى أن المصدر B سيكون متأخرا عن المصدر A بمقدار دورة واحدة كاملة . ومن ثم فإن كلا منهما سوف يبعث تضاغطا فى هذه اللحظة ، ولذلك يصبح الصوت قويا مرة أخرى .

وتتكرر هذه العملية كما هو مبين فى الشكل ١٥ — ١١ . ففى اللحظات $t=0,1,2,3$ ... etc s يكون المصدران متفقى الطور ويسمع صوت قوى . أما فى اللحظات $t=\frac{1}{2}$ ، $1\frac{1}{2}$ ، $2\frac{1}{2}$...etc s فلن يسمع أى صوت لأن المصدرين سيكونان متفاوتى الطور بمقدار $180°$. ومن ثم فإن الأذن سوف تسمع سلسلة من النبضات الصوتية ، أو الضربات ، مرة واحدة فى كل ثانية كما هو موضح فى الرسم البيانى الذى يمثل العلاقة بين شدة الصوت والزمن فى الشكل ١٥ — ١١ .

لاحظ أن الترددين يختلفان أحدهما عن الآخر بمقدار 1 cps ، ولذلك تسمع ضربة واحدة فى كل ثانية فى هذه الحالة . ويمكنك اجراء التحليل السابق بالنسبة لحالة يختلف فيها الترددان بمقدار 3 cps ، مثلا . وسوف ترى عندئذ أن عدد الضربات التى تحدث فى الثانية هو 3 تماما . وفى الحقيقة فإن عدد الضربات فى الثانية يساوى الفرق بين ترددى المصدرين . وعند ضبط وتر البيانو يحاول الموسيقى أن يضبط شد الوتر حتى يصبح الفارق الزمنى بين ضربات الصوت الصادر من وتر البيانو والصوت الصادر من الشوكة الرنانة كبيرا جدا .

تحدث ظاهرة الضربات فى أى نوع من الاهتزاز يكون ناتجا من تراكب اهتزازين منبعثين من مصدرين مختلفين فى التردد . ولهذا يمكن استخدام هذه الظاهرة لمقارنة ترددات الاهتزازات الاخرى غير الاهتزازات الصوتية . وقد رأينا هنا أن هذه الطريقة دقيقة جدا لمقارنة الترددات .

شكل (١٥ — ١٢)
يحدث الرنين إذا كان مستوى الماء فى الأنبوبة فى الوضع الصحيح .



١٥ — ٩ أنابيب الارغن والأعمدة الهوائية المهتزة

إذا وضعت شوكة رنانة مهتزة بالقرب من فوهة أنبوبة زجاجية مملوءة جزئيا بالماء ، فإن الصوت الصادر من الشوكة الرنانة يمكن أن يكبر بدرجة كبيرة تحت شروط معينة . ولتفسير هذه الظاهرة اعتبر التجربة الموضحة فى الشكل ١٥ — ١٢ . توضع

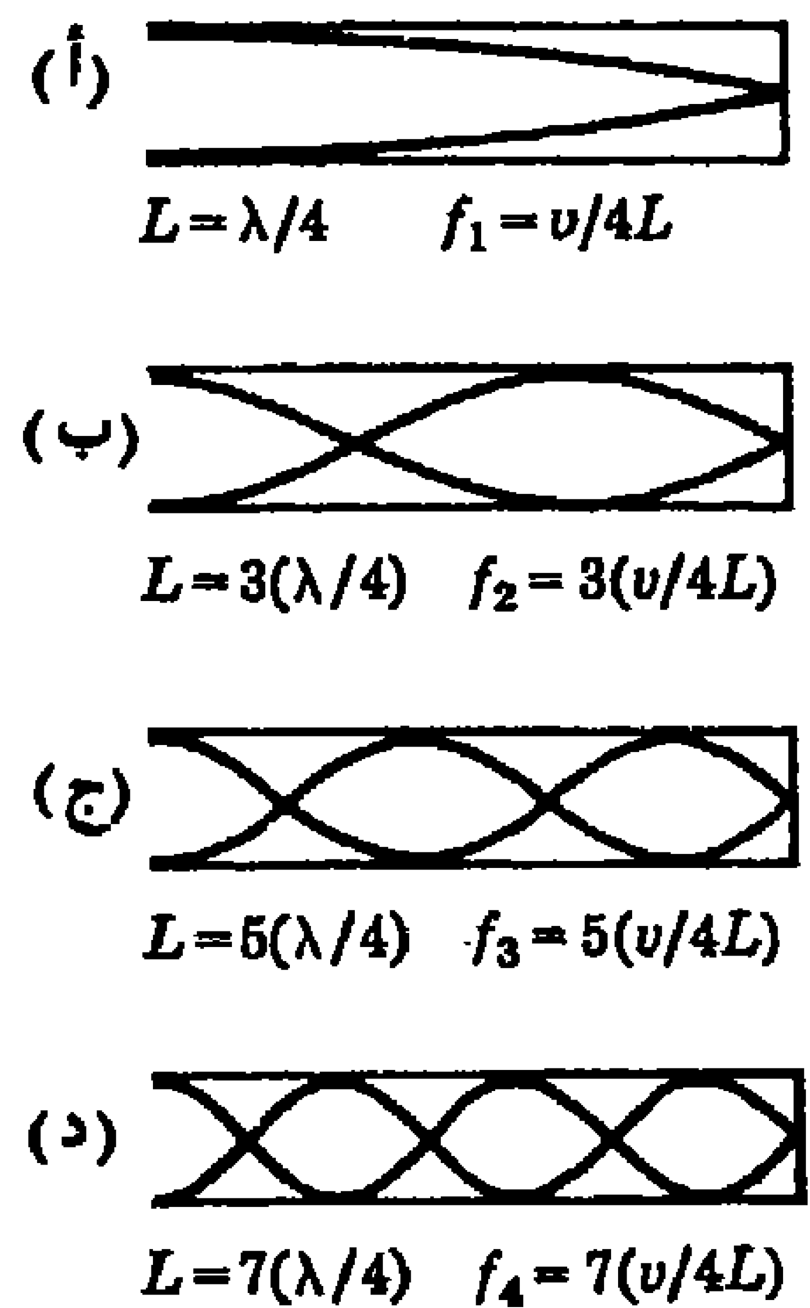
الشوكة الرنانة المهتزة بالقرب من فوهة الانبوبة الزجاجية كما هو مبين بالشكل . فإذا رفع الخزان R إلى أعلى فإن مستوى سطح الماء سوف يرتفع فى الانبوبة الزجاجية ، وعند ارتفاع معين لسطح الماء فى الانبوبة سيسمع رنين قوى فى الهواء الموجود بالانبوبة استجابة للصوت الصادر من الشوكة الرنانة . وفى الحقيقة فإن الرنين يحدث عادة عند ارتفاعات مختلفة لعمود الهواء .

هذه الحالة تشبه حالة الوتر المهتز فى كثير من الوجوه . ذلك أن الموجة الصوتية التى تتحرك فى العمود الهوائى داخل الأنبوبة (أو فى الوتر) سوف تنعكس عند وصولها إلى نهاية العمود الهوائى ثم تسير فى الاتجاه المعاكس لتصل إلى موضع المصدر المهتز حيث تنعكس مرة أخرى . فإذا كان طول العمود الهوائى (أو الوتر) مناسبا ، فإن المصدر سوف يقوى الموجة المنعكسة عند بدء تحركها إلى أسفل فى الانبوبة مرة ثانية . ومن ثم فإن المصدر سوف يقوى الموجة باستمرار بنفس الطريقة التى ترتفع بها الارجوحة إلى ارتفاع كبير تحت تأثير سلسلة من الدفعات الصغيرة . وقد ناقشنا الفكرة العامة للرنين بالتفصيل فى الفصل الثالث عشر ، وسنقوم الآن بتطبيق النتائج التى توصلنا اليها انذاك على حالة العمود الهوائى المهتز .

تتكون فى الانبوبة المبينة فى الشكل ١٥ — ١٢ عقدة عند الطرف المغلق للعمود الهوائى وبطن بالقرب من الطرف المفتوح له . هذا لأن جزيئات الهواء لا يمكنها أن تتحرك عند الطرف المغلق للعمود الهوائى لأن الماء يمنعها من الحركة إلى أسفل . أما عند الطرف المفتوح فإن الجزيئات تستطيع أن تتحرك بسهولة إلى الخارج . ومن ثم فإن سعة الحركة الاهتزازية تصل إلى أقصى قيمة عند هذه النقطة ، أى أن هذه النقطة عبارة عن بطن* .

نرى من ذلك أن رنين الانبوبة يمكن أن يحدث فقط إذا كان للموجات عقدة عند طرفها المغلق وبطن عند طرفها المفتوح ، ويوضح الشكل ١٥ — ١٣ رسما تخطيطيا لبعض هذه الموجات . تذكر أن المسافة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين تساوى $\lambda/2$ ، إذن المسافة بين العقدة والبطن المجاور تساوى $\lambda/4$. فإذا رمزنا لطول الانبوبة بالرمز L ، فإن طول الانبوبة فى الشكل ١٥ — ١٣ أ هو المسافة بين العقدة والبطن المجاور ، أى أن $L = \lambda/4$. أما فى الجزء ب فإن طول الانبوبة يساوى ثلاثة أضعاف المسافة بين العقدة والبطن المجاور ، أى أن $L = 3(\lambda/4)$ وهكذا .

شكل (١٥ — ١٣)
بعض أنماط بسيطة للاهتزاز الرنينى فى أنبوبة مغلقة عند أحد طرفيها .



* البطن لايوجد عند طرف الأنبوبة تماما ، ومع ذلك فإن هذا التعقيد يمكن اهماله عادة إذا كان نصف قطر الأنبوبة اصغر كثيراً من λ .

ويمكن حساب تردد الرنين فى كل من الحالات المبينة فى الشكل ١٥ – ١٣ باستخدام حقيقة أن $f = v/\lambda$. وبالتعويض فى هذه المعادلة عن λ بدلالة L كما هو مبين فى الشكل ١٥ – ١٣ يمكن حساب تردد الرنين فى كل حالة بسهولة . لاحظ أن **النغمة التوافقية الأولى** f_2 تساوى $2f_1$ ، وان **النغمة التوافقية الثانية** f_3 تساوى $3f_1$ ، وهكذا . وفى المصطلحات التى تستخدم عادة يسمى التردد $2f_1$ التوافقية الثانية ، ويسمى التردد $3f_1$ التوافقية الثالثة ... الخ . وفى هذه الحالة يحدث الرنين فى الأنبوبة استجابة لترددات التوافقية الفردية فقط . وحيث أن تردد الشوكة الرنانة يكون معلوما عادة ، فمن الممكن إذن استخدام ظاهرة الرنين فى أنبوبة كالمبين فى الشكل ١٥ – ١٢ لقياس سرعة الصوت v .

تشبه أنابيب الارغن الأنبوبة السابق ذكرها فى وجوه كثيرة . غير أن اهتزاز العمود الهوائى فى أنبوبة الارغن يتم بالنفخ فى تجويف ذى شكل معين موجود عند احد طرفى الأنبوبة . ويعتبر عمل الصفارة الموجودة فى الأنبوبة معقدا جدا ، وسنكتفى بأن نقول أن عملية النفخ تنتج أنواعا كثيرة من الاهتزازات . وتهتز الانبوبة رنينيا استجابة لأحد الاهتزازات المناسبة التى تولدها الصفارة .

يحدث الرنين فى أنابيب الأرغن المغلقة بنفس الطريقة التى يحدث بها الرنين فى الأنبوبة الموضحة فى الشكل ١٥ – ١٣ . وكما سبق أن وضحنا ، لابد أن يتكون بطن بالقرب من الطرف المفتوح حيث توجد الصفارة ، وعقدة عند الطرف المغلق ، وتكون الترددات الرنينية كما هو موضح فى الشكل ١٥ – ١٣ . ويمكن الحصول على نغمتين فى أنبوبة ارغن واحدة فى ذات الوقت باستثارة رنينين فى نفس الوقت . وفى هذه الحالة يحدث تغير كبير فى نوع الصوت ، ولكن هذا الصوت يسمع كنغمة واحدة .

وفى حالة أنابيب الارغن المفتوحة يجب أن تتكون عقدتان بالقرب من طرفى الأنبوبة . ويمكن الحصول على انماط وترددات الرنين بطريقة مشابهة لما اتبعناه فى الحصول عليهما فى حالة الأنبوبة المغلقة من أحد طرفيها والموضحة فى الشكل ١٥ – ١٣ . وفى هذه الحالة سيكون الموقف كما هو مبين فى الشكل ١٥ – ١٤ . ويلاحظ فى هذه الحالة أن جميع التوافقيات موجودة . فالنغمة التوافقية الأولى هى $2f_1$ والنغمة التوافقية الثانية هى $3f_1$ ، وهكذا .

شكل (١٥ – ١٤)
بعض أنماط بسيطة للاهتزاز الرنينى فى أنبوبة مفتوحة من طرفيها .

(أ) $L=\lambda/2 \quad f_1=v/2L$

(ب) $L=2(\lambda/2) \quad f_2=2(v/2L)$

(ج) $L=3(\lambda/2) \quad f_3=3(v/2L)$

(د) $L=4(\lambda/2) \quad f_4=4(v/2L)$

١٥ – ١٠ السلالم الموسيقية والتركيبات التوافقية (أو الهارمونية)

تسمى النسبة بين ترددى نغمتين **بالمسافة الموسيقية** .ويعبر عن هذه المسافة عادة فى صورة نسبة بين التردد الاكبر والتردد الاصغر ، بحيث تكون المسافة عددا أكبر من الوحدة . من هذا التعريف نجد أن المسافة الموسيقية من 800 cps إلى

600 cps ، وهى $\frac{4}{3}$ ، تساوى المسافة الموسيقية من 1200 cps إلى 900 cps وهى $\frac{4}{3}$ أيضا .

وقد تبين بالخبرة أن معظم الناس يحسون بتوافق وانسجام النغمات إذا كانت مسافاتها الموسيقية عبارة عن نسبة بين عددين صحيحين صغيرين ، فمثلا ، المسافة الموسيقية بين النغمتين 1200 cps و 600 cps هى $\frac{2}{1}$ ، وهذه المسافة تسمى بالجواب . وحيث أن المسافة بين هاتين النغمتين هى النسبة بين عددين صحيحين صغيرين ، فإنهما متوافقتين تماما . ومن ناحية أخرى ، المسافة الموسيقية بين النغمتين 300 cps و 150 cps تساوى $\frac{11}{5}$ ، ولذلك فإنهما ليستا متوافقتين بنفس الدرجة كالتركيبة $\frac{2}{1}$ المذكورة سابقا .

يتكون السلم الموسيقى الطبيعى الكبير من المجموعة الآتية من المسافات الموسيقية :

do $\frac{9}{8}$ re $\frac{10}{9}$ mi $\frac{16}{15}$ fa $\frac{9}{8}$ sol $\frac{10}{9}$ la $\frac{9}{8}$ ti $\frac{16}{15}$ do′

ومن الواضح أنه إذا عزفت النغمتان « دو » و « رى » سويا سنحصل على نشاز لأن المسافة الموسيقية هى $\frac{9}{8}$. وهى النسبة بين عددين كبيرين تماما . ومع ذلك فإن التركيبات الأخرى من هاتين النغمتين أكثر توافقا . ويمكننا أن نرى ذلك بأن نحدد ترددات معينة لهذه النغمات . فإذا كان تردد النغمة « دو » هو 264 cps ، فإن نغمات السلم الموسيقى السابق ستكون كمايلى :

do	re	mi	fa	sol	la	ti	do′
264	297	330	352	396	440	495	528

ومن الواضح أن النسبة $\frac{330}{264}$ هى $\frac{5}{4}$ ، وعليه فإن النغمتين « دو » و « مى » متوافقتان بدرجة جيدة . ومع ذلك فإن « دو » و « فا » ، حيث النسبة بينهما $\frac{4}{3}$ ، أكثر توافقا ، كذلك فإن النغمتين « دو » و « صول » ، حيث النسبة بينهما $\frac{3}{2}$ ، أكثر توافقا من الحالتين السابقتين ، ولذلك فانهما أكثر اطرابا . ويمكنك أن تحدد بنفسك النغمات التى تتوافق مع بعضها البعض أكثر من الأخرى . ومن المفضل أن تختبر صحة استنتاجاتك باستعمال البيانو . وقد اختيرت هذه الترددات بحيث تكون النغمة « دو » هى الاصبع C المتوسط ، وتحتل النغمات الأخرى المواضع D ، E ، F ، G ، A ، B ، C′ على الترتيب .

وبالرغم من هذه التعميمات المتعلقة بالاصوات السارة وغير السارة ، يجب أن نعترف بأن احساس الشخص بالموسيقى يعتمد على خلفيته الثقافية . ويعطينا تاريخ

الموسيقى أمثلة مثيرة عن مدى تغير الذوق الموسيقى عند البشر . ولن نحتاج أن نغوص فى اعماق التاريخ إلى أبعد من القرن الحالى لنرى أن الأذواق الموسيقية تتغير من زمن إلى آخر . فكثير من المؤلفين الموسيقيين الذين تلاقى أعمالهم اليوم نجاحا كبيرا قد ذاقوا مرارة الفشل عندما عزفت أعمالهم لأول مرة إذ كانت موسيقاهم تعتبر مزعجة جدا . ونحن نعلم من خبراتنا الخاصة أن الجيل السابق ينظر إلى الموسيقى الحديثة على أنها مجموعة غير متآلفة من الأصوات المزعجة والمثيرة للاشمئزاز . وهذا أيضا هو انعكاس لحقيقة أن الذوق الموسيقى يتغير باستمرار .

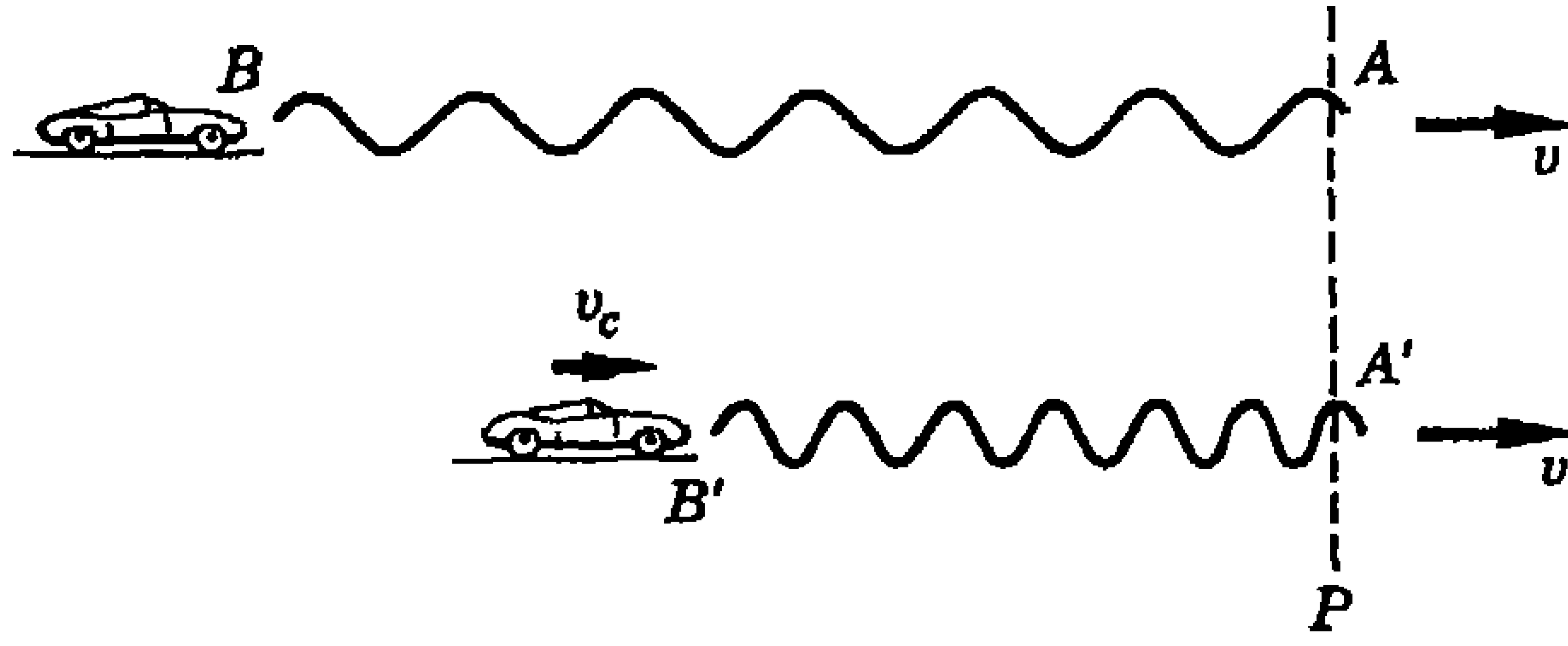
وتتضح احدى السمات الاخرى للذوق الموسيقى عند مقارنة موسيقى الحضارات المختلفة بعضها ببعض . فمثلا ، تسبب الموسيقى العربية احساسا بالقلق والاستثارة والتهيج لدى معظم الامريكيين ، ولا ينظرون اليها الا كبدعة عابرة . ذلك أن التركيبات النغمية فى الموسيقى العربية تختلف اختلافا تاما عن التركيبات المستخدمة على نطاق واسع فى الموسيقى الغربية ، ولذلك فإن هذه الموسيقى تبدو للاجانب متنافرة ورتيبة معا . ولايحس الانسان الغربى بجمال هذه الموسيقى الا بعد استماع طويل لها وتأمل كبير فيها . ومن الواضح أن الجوانب النفسية للموسيقى أكثر تعقيدا جدا من الموجات الصوتية التى نفهمها جيدا والتى تحمل الموسيقى إلى اذآننا .

١٥ – ١١ ظاهرة دوبلر .

إذا كنت واقفا على جانب طريق تتحرك عليه سيارة سريعة آتية من بعيد مطلقة نفيرها فإنك سوف تلاحظ ظاهرة غريبة . فبالرغم من أن درجة صوت النفير تستمر ثابتة إلى أن تصبح السيارة فى محاذاة نقطة المشاهدة تقريبا ، الا أنها سوف تنقص فجأة عندما تمر بك السيارة وتستمر على هذا المستوى الجديد أثناء تباعدها على الطريق . وتسمى الظاهرة التى تحدث فى هذه الحالة ، وكذلك فى حالات فيزيائية اخرى ، **ظاهرة دوبلر** .

فإذا كنت واثقا فى اذنيك ، فإن ظاهرة دوبلر تعنى أن تردد الصوت الذى يصل إلى طبلة الأذن يكون أعلى عندما تتحرك السيارة مقتربة منك عن قيمته إذا كانت السيارة تتحرك مبتعدة عنك . وهذا يعنى ، باسلوب آخر ، أن عدد القمم الموجية التى تصل إلى الأذن يكون أكبر إذا كانت السيارة تتحرك نحوك عن قيمتها إذا كانت السيارة تتحرك مبتعدة عنك . وسوف نثبت الآن أن هذا معقول وأن من الممكن ايجاد معادلة لهذه الظاهرة بسهولة .

شكل (١٥ - ١٥)
تنشأ ظاهرة دوبلر إذا كان المصدر الصوتى متحركا .



ويوضح الشكل ١٥ - ١٥ هذا الموقف الفيزيائى ، ويمثل الجزء العلوى من الشكل سيارة ساكنة والموجة الصوتية المنطلقة من النفير والتى تتحرك مبتعدة عنها . لنفرض أن السيارة الموضحة فى الجزء السفلى من الشكل تتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v_c وأنها تطلق نفيرا مماثلا للنفير الأول . لنفرض أيضا أن النفير العلوى قد أطلق القمة الموجية A، وأن النفير السفلى قد أطلق القمة الموجية A' فى لحظة عبور السيارة السفلى للسيارة العليا تماما . وحيث أن كلتا القمتين تتحركان إلى اليمين بنفس السرعة v ، وهى سرعة الصوت فى الهواء ، فإنهما ستظلان متلازمتين كما هو مبين .

ومع ذلك فإن الموجات المنبعثة من النفير السفلى سوف تنضغط فى حيز أصغر . كما هو مبين بالشكل ، نتيجة لحركة السيارة السفلى إلى اليمين . ومن ثم فإن عدد القمم الموجية التى تصل إلى النقطة P فى الثانية سيكون أكبر فى هذه الحالة مما فى حالة السيارة الساكنة العليا . لذلك فإن تردد الصوت المنبعث من نفير السيارة السفلى سيكون أكبر عند P مما لو كانت السيارة ساكنة . لنحسب الآن هذا التغير فى التردد .

نظرا لحركة السيارة السفلى إلى اليمين ، لابد أن يقل الطول الموجى للموجة الصوتية المنبعثة من نفيرها بمقدار $v_c\tau$ حيث v_c سرعة السيارة ، τ الزمن الدورى للصوت المنبعث من نفيرها ، وذلك لأن السيارة سوف تتحرك مسافة قدرها $v_c\tau$ فى خلال الزمن τ الذى تنطلق فيه القمم الموجية . ونتيجة لذلك تنضغط القمم الموجية المنبعثة فى خلال هذا الزمن بنفس المقدار ، أى $v_c\tau$. فإذا كانت λ هى الطول الموجى للصوت المنبعث من السيارة الساكنة ، فإن الطول الموجى للصوت المنبعث من السيارة المتحركة λ' سيكون :

$$\lambda' = \lambda - v_c\tau$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة بالتعويض عن $\lambda = v/f$ ، $\tau = 1/f$ ، حيث v سرعة الصوت فى الهواء ، f تردد اهتزاز النفير ، وأيضا $\lambda' = v/f'$ حيث f' هو تردد الصوت الذى يسمعه شخص موجود عند النقطة P من السيارة المتحركة . وبذلك يمكننا كتابة المعادلة السابقة على الصورة :

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f} - \frac{v_c}{f}$$

ومنه :

زحزحة دوبلر

$$\frac{f'}{f} = \frac{1}{1 - v_c/v} \qquad (١٥ - ٢)$$

حيث v_c سرعة المصدر الصوتى . ويمكن اعادة صياغة هذه المعادلة فى صورة مفيدة إذا كان التغير فى التردد $\Delta f = f' - f$ صغيرا . وعندئذ :

$$\frac{\Delta f}{f'} = \frac{v_c}{v} \approx \frac{\Delta f}{f}$$

وبهذا التقريب يمكننا أن نعتبر أن v_c هى سرعة اقتراب المصدر والمشاهد احدهما من الآخر . وتنطبق هذه المعادلة إذا كان المصدر الصوتى متحركا والمشاهد ساكنا ، وكذلك إذا كان المصدر الصوتى ساكنا والمشاهد متحركا .

نرى من ذلك ، كما هو متوقع ، أنه كلما زادت النسبة v_c/v ، كلما زادت النسبة f'/f أيضا . فإذا كانت السيارة ساكنة ، أى عندما تكون $v_c = 0$ فإن $f'=f$. أما إذا كانت v_c أكبر من الصفر ، فإن تردد الصوت f' سيكون أعلى من تردد النفير f . وكمثال نموذجى ، إفترض أن السيارة تتحرك بسرعة قدرها 80 ft/s(55 mi/h) . إذن ، حيث أن سرعة الصوت تساوى حوالى 1000 ft/s فإن $v_c/v = 0.080$ ، وعليه فإن النسبة بين تردد الصوت وتردد النفير هى :

$$\frac{f'}{f} = \frac{1}{1 - 0.080} = 1.08$$

فإذا كان تردد نفير السيارة هو 500 Hz . فإن تردد صوت النفير المتحرك سيكون 450 Hz .

تنطبق المعادلة (١٥ — ٢) أيضا على الصوت المنبعث من سيارة متباعدة ، بشرط أن تلاحظ أن v_c ستكون عندئذ سالبة ، وفى هذه الحالة ستؤدى حركة السيارة المتباعدة إلى مط الموجة الصوتية بدلا من ضغطها ، وعليه فإن النسبة f'/f ستكون أقل من الوحدة . وإذا طبقت نفس الخطوات المتبعة فى ايجاد المعادلة (١٥— ٢) على السيارة المتباعدة ، لابد أن تراعى استخدام $-v_c$ بدلا من v_c فى جميع المعادلات . إذن ، تنطبق المعادلة (١٥ — ٢) على كلتا الحالتين ، بشرط أن تعتبر v_c موجبة إذا كان المصدر الصوتى يتحرك مقتربا من المشاهد وسالبة إذا كان المصدر الصوتى يتحرك مبتعدا عن المشاهد .

١٥ – ١٢ الموجات الصدمية ودوى اختراق جدار الصوت

رأينا فى الجزء السابق أن تردد الصوت المسموع يكون أكبر من التردد الحقيقى إذا كان المصدر الصوتى يتحرك مقتربا من المشاهد . وتحدث ظاهرة غريبة عندما تقترب سرعة المصدر الصوتى من سرعة الصوت أو تصبح مساوية لها . وذلك أننا سنجد من المعادلة (١٥ – ٢) أن تردد الصوت f' سيقترب من مالا نهاية فى هذه الحالة . وهذا يعنى ببساطة أن عددا لانهائيا من القمم الموجية سوف يصل إلى السامع فى وقت قصير جدا . ويمكننا أن نفهم هذا بسهولة بالرجوع مرة ثانية إلى الشكل ١٥ – ١٥ .

لنفرض أن سرعة السيارة المتحركة تساوى سرعة الصوت . عندئذ سوف تنطبق النقطة B' على النقطة A' . ونتيجة لذلك سوف تقع جميع القمم الموجية الموجودة بين A' ، B' فوق بعضها البعض . ولهذا فإن جميع هذه القمم الموجية ، وكذلك المصدر الصوتى نفسه ، سوف تعبر النقطة P فى نفس اللحظة . وعليه فإن طاقة الموجة الصوتية كلها سوف تنضغط فى منطقة صغيرة جدا أمام المصدر الصوتى . وبالتالى سوف تسبب هذه المنطقة المكثفة جدا من الطاقة الصوتية ، أو الموجة الصدمية ، صوتا عاليا جدا عند مرورها بالنقطة P . وهذا هو اساسا مصدر دوى اختراق جدار الصوت الذى يصاحب الطائرات فوق الصوتية .

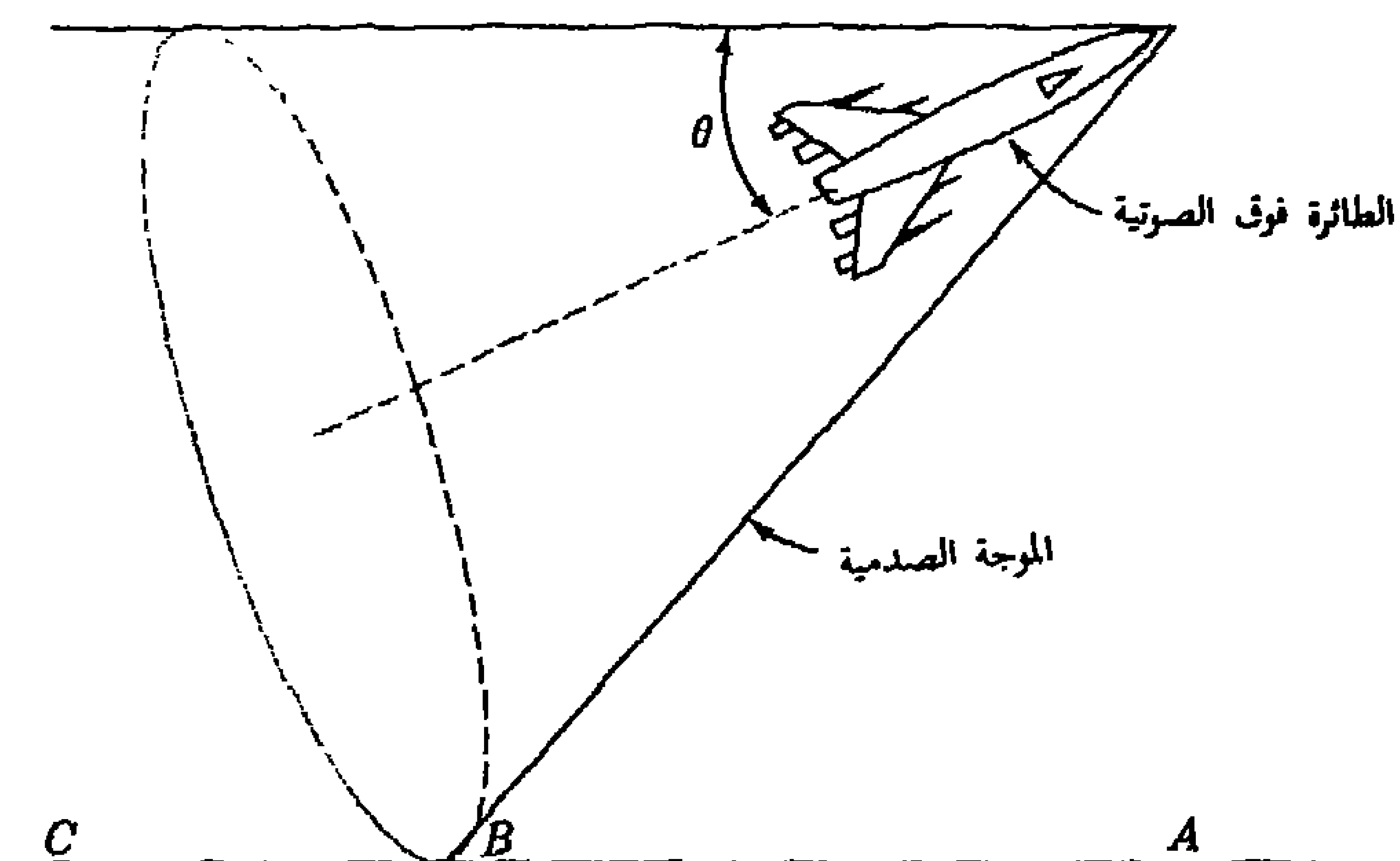
عندما تتحرك طائرة فى الهواء بسرعة قريبة من سرعة الصوت تتراكم الضوضاء والاضطرابات الهوائية الناتجة من حركة الطائرة مكونة الموجة الصدمية ، وهى ببساطة عبارة عن منطقة مكثفة جدا من الطاقة الصوتية كما وضحنا سابقا . ويعتمد الشكل الحقيقى للموجة الصدمية على سرعة الطائرة . ولكنها عموما تغطى سطح مخروط كما هو مبين فى الشكل ١٥ – ١٦ . وتعتمد زاوية المخروط بدورها على النسبة بين سرعة الطائرة v_p وسرعة الصوت v حسب العلاقة التالية :

$$\sin\theta = \frac{v}{v_p}$$

وواضح من هذه المعادلة أن زاوية المخروط تقل عندما تصبح سرعة الطائرة v_p أكبر من سرعة الصوت v ، وتسمى النسبة v_p/v عادة **العدد الماخى** . وعليه فإذا كانت الطائرة تتحرك بسرعة قدرها Mach 2 فإن هذا يعنى أنها تتحرك بسرعة تساوى ضعف سرعة الصوت .

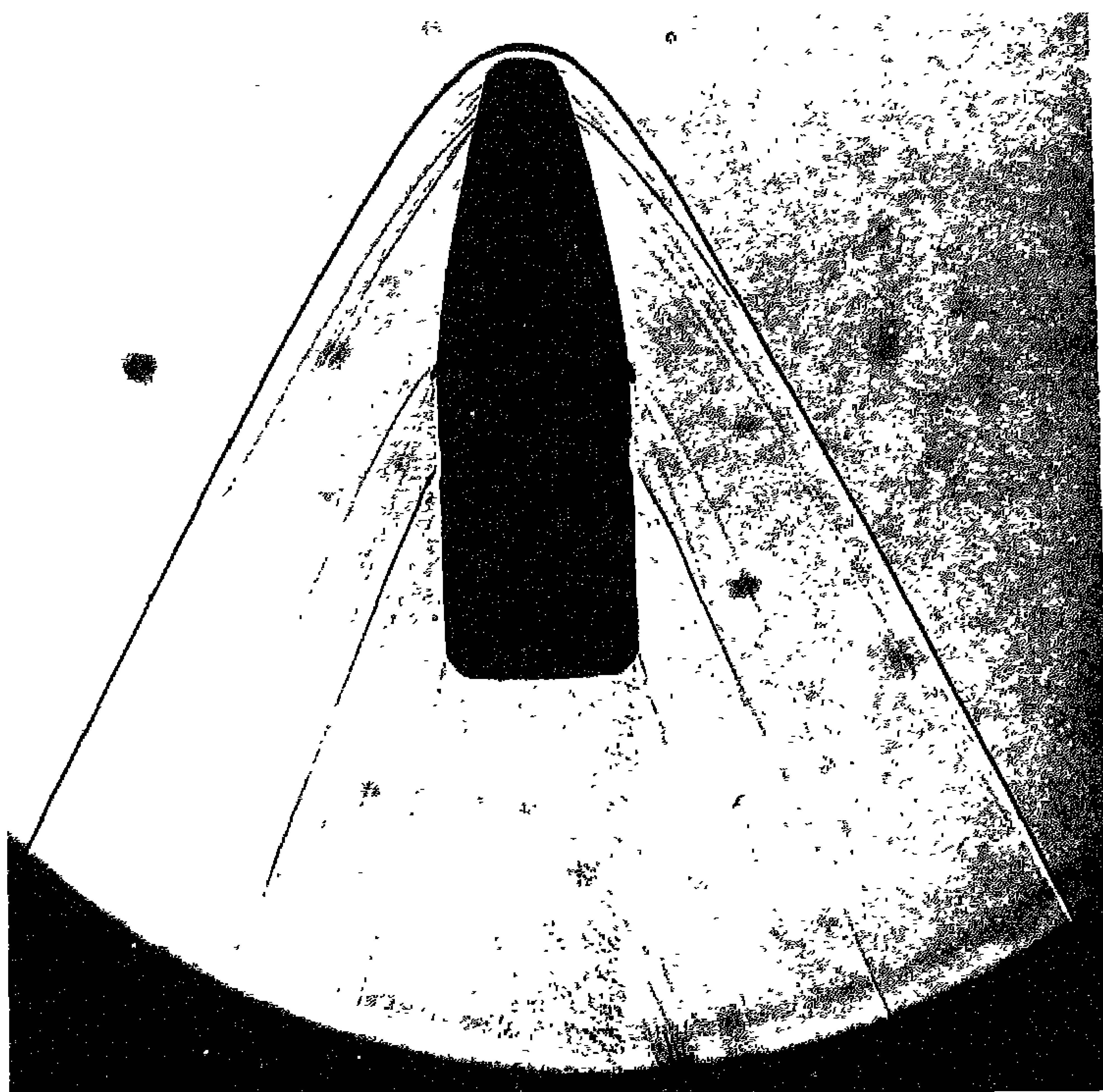
وحيث أن الموجة الصدمية هى منطقة من الطاقة الصوتية المكثفة جدا ، فإنها يمكن أن تسبب تدميرا شديدا عند اصطدامها بشىء ما . **فدوى اختراق جدار الصوت** المعروف لنا جميعا ما هو الا نتيجة لمرور السطح المخروطى للموجة

شكل (١٥ - ١٦)
اصطدم دوى اختراق جدار الصوت بالفعل بالنقطة C ويتحرك الآن تجاه A مارا بالنقطة B .



الصدمية فوق الأرض . فمثلا ، وواضح من الشكل ١٥ - ١٦ أن دوى اختراق جدار الصوت قد اصطدام بالنقطة C فى لحظة سابقة وأنه يصطدم بالنقطة B فى اللحظة الحالية وأنه سوف يصل حالا إلى النقطة A . ويعتمد التأثير التدميرى للموجة الصدمية بالطبع على شدة هذه الموجة . ويمثل الشكل ١٥ - ١٧ صورة فوتوغرافية وميضية للموجة الصدمية التى يسببها مقذوف فى الهواء . هل يمكنك أن تثبت أن سرعة المقذوف تساوى حوالى 2.1 قدر سرعة الصوت فى الهواء ؟

شكل (١٥ - ١٧)
الموجات الصدمية التى يسببها مقذوف منطلق فى الهواء .



ملخص

الموجات الصوتية هى موجات تضاغطية فى مائع أو جامد . عندما تصطدم الموجات الصوتية بطبلة الأذن تؤدى إلى الاحساس بالسمع . يرسل المصدر الصوتى تضاغطات وتخلخلات فى المادة القريبة منه . سرعة الصوت فى الهواء عند درجة 0°C تساوى 331 m/s (1086 ft/s) . تزداد سرعة الصوت فى الهواء بحوالى 0.60 تقريبا لكل ارتفاع فى درجة الحرارة بمقدار 1°C .

شدة الموجة هى القدرة المارة خلال وحدة المساحة المقامة عموديا على اتجاه انتشار الموجة . تقع الاصوات المسموعة فى مدى الشدة الذى يمتد من حوالى 10^{-12} W/m² إلى حوالى 1 W/m² . حيث أن الأذن جهاز كشف لوغاريتمى ، تقاس شدة الصوت عادة على مقياس لوغاريتمى . يرتبط مستوى شدة الصوت بالديسيبل مع شدة الموجة الصوتية بالواط لكل متر مربع I بالكمية $10 \log(I/10^{-12})$.

يستطيع معظم الاشخاص سماع الاصوات التى يقع ترددها بين حوالى 20 Hz وحوالى 20,000 Hz . تسمى الموجات الصوتية التى يزيد ترددها عن 20,000 Hz بالموجات فوق السمعية . تصل حساسية الأذن العادية إلى أقصى قيمة بالقرب من 3000 Hz .

تتكون معظم الاصوات من خليط من عدة موجات ذات ترددات مختلفة . يختلف نوع الصوت باختلاف مركبات هذا الخليط من الموجات الصوتية . لهذا تعطى الآلات الموسيقية المختلفة ، مثلا ، أصواتا مختلفة بالرغم من أنها تعزف نفس التردد الاساسى .

يمكن أن تتراكب الموجات متساوية التردد لتؤدى إلى ظواهر التداخل . إذا كانت الموجات متفقة الطور فإنها تتداخل تداخلا بناءا لتعطى صوتا جهيرا . أما إذا كانت متفاوتة فى الطور بمقدار $\frac{1}{2}\lambda$ أو 180° ، فإنها تلاشى بعضها البعض . عندما تتداخل موجتان مختلفتان اختلافا طفيفا فى التردد فإنها تؤدى إلى ظاهرة الضربات . عدد الضربات فى الثانية يساوى الفرق بين الترددين .

تحدث ظاهرة الرنين فى المواسير والأنابيب . تتكون عقدة موجية عند الطرف المغلق ويتكون بطن موجى عند الطرف المفتوح .

قد يتغير تردد الصوت الذى يصل إلى الاذن نتيجة لحركة المصدر مقتربا أو مبتعدا عن المشاهد . تسمى هذه الظاهرة ظاهرة دوبلر . إذا كان المصدر والمشاهد يقتربان احدهما من الآخر فإن تردد الصوت يزداد . وإذا كان يبتعدان احدهما عن الآخر فإن التردد ينخفض .

تحدث الموجات الصدمية عندما تتحرك المصادر الصوتية بسرعة اكبر من سرعة الصوت . تتكون هذه الموجات الصدمية من اضطرابات موجية مكثفة جدا وتحمل كميات كبيرة من الطاقة فى منطقة محدودة . عندما تصطدم الموجات الصدمية بمشاهد فإنها تؤدى إلى مايسمى دوى اختراق جدار الصوت .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – شرح ماذا نعنى بالموجة الصوتية وتوضيح لماذا لاينتقل الصوت فى الفراغ .

٢ – ذكر سرعة الصوت فى الهواء عند درجة 0°C وحساب قيمتها عند درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة الغرفة .

٣ – تعريف شدة الصوت . توضيح لماذا يعتبر مقياس الديسيبل مناسبا للتعبير عن مستوى شدة الصوت . ايجاد مستوى شدة الصوت بالديسيبل بمعلومية شدة الصوت بالواط لكل متر مربع .

٤ – تخطيط رسم بيانى مشابه للرسم المعطى فى الشكل ١٥ – ٥ وتفسيره بالالفاظ .

٥ – شرح مفهوم نوع الصوت وتوضيح لماذا يختلف نوع الصوت عن تردده .

٦ – تركيب موجتين متساويتين فى التردد والسعة ومختلفتين فى الطور للحصول على تداخل بناء وتداخل اتلافى . تطبيق مافهمته فى حل المسائل البسيطة كالمثال التوضيحى ١٥ – ٢ .

٧ – استخدام ظاهرة الضربات لايجاد الفرق فى التردد بين مصدرين صوتين .

٨ – ايجاد الترددات الرنينية للصوت فى أنابيب معينة .

٩ – شرح ماذا نعنى بظاهرة دوبلر وحساب زحزحة التردد التى تلاحظ عند اقتراب المصدر الصوتى .

١٠ – شرح كيفية تكون الموجة الصدمية وتوضيح لماذا تؤدى هذه الموجة إلى دوى اختراق جدار الصوت .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الموجة الصوتية

الجبهة الموجية

شدة الصوت

مستوى شدة الصوت بالديسيبل

الأذن كجهاز لوغاريتمى

نوع الصوت

الموجات فوق السمعية

متفق الطور ومتفاوت الطور

فرق طور قدره $0°$ و $180°$

الضربات

النغمات التوافقية ضد التوافقيات

المسافة الموسيقية

ظاهرة دوبلر

الموجة الصدمية ودوى اختراق جدار الصوت

العدد الماخى

اسئلة وتخمينات

١ – صف بوضوح لماذا لايسمع الجرس الذى يدق فى غرفة تفريغ فى الخارج .

٢ – هل نتوقع أن يكون تردد الصوت المسموع تحت الماء مساويا لتردد الصوت المسموع فى الهواء إذا كان المصدران متماثلين تماما ؟ اشرح .

٣ – عندما يستنشق رجل غليظ الصوت غاز الايدروجين ثم يتكلم فإن صوته يصبح عالى الدرجة . لماذا .

٤ – لنفرض أن مجموعة من أنابيب الارغن معلقة بالقرب من ماسورة بخار . هل يؤثر ذلك على عمل الارغن ؟ اشرح .

٥ – يمكن عمل سرينة بثقب مجموعة من الفتحات متساوية البعد عن بعضها البعض على دائرة متمركزة مع محور لوح أو قرص معدنى صلب . وعندما تدور هذه الدائرة أثناء اندفاع تيار من الهواء عليها بالقرب من الفتحات تنبعث نغمة شبيهة بالسرينة . اشرح كيف يعطى ذلك احساسا بالصوت للأذن واذكر العوامل التى تؤثر على درجة ونوع النغمة .

٦ – يقال أن مغنيا معينا يمكنه أن يحطم كوبا زجاجيا بأن يغنى نغمة معينة . هل يمكن أن يكون هذا صحيحا ؟ اشرح .

٧ – عندما ينفجر سهم نارى مفرقع فى غرفة كبيرة كالجيمنيزيوم (صالة الالعاب الرياضية) يستمر الصوت بعض الوقت ثم يتلاشى . اشرح مايحدث للطاقة الصوتية المنبعثة أثناء الانفجار .

٨ – زمن الترداد لغرفة هو الزمن اللازم لتلاشى الصوت – نغمة من أنبوبة ارغن مثلا – بعد أن يتوقف المصدر . اشرح لماذا يقل زمن الترداد إذا كانت النوافذ مفتوحة . ماهى الوسائل الاخرى التى يمكن استخدامها للتحكم فى زمن الترداد ؟

٩ – يوجد فى الاسواق جهاز يستخدم الموجات فوق السمعية فى الماء لازالة القاذورات العالقة بالملابس والاشياء الاخرى . اشرح كيف يعمل هذا الجهاز واذكر مزاياه وعيوبه .

١٠ – يمكن استخدام زجاجات المشروبات الخفيفة فى اصدار الصوت بالنفخ فى فوهتها بالطريقة المناسبة . قدر الترددات الرنينية للزجاجة . اختبر صحة اجابتك بالاستعانة بالشوك الرنانة أو مذبذب أو مجهار معايرين . (ق)

١١ – عند اجراء الابحاث تحت الماء يستخدم السونار عادة « للرؤية » تحت الماء . ويقوم هذا الجهاز بارسال النبضات الصوتية فى الماء وتستقبل بعد ذلك النبضات المنعكسة عند نقطة الارسال . اشرح كيف تستكشف المناطق المجاورة بهذه الطريقة . ماهى أوجه التشابه بين السونار والرادار . وتستخدم الخفافيش نوعا من السونار فى طيرانها فى الكهوف المظلمة . كيف يعمل هذا الجهاز ؟

١٢ – افترض أن نوعا من الكائنات البشرية يعيش على كوكب بعيد وأن اجهزتها السمعية مصممة كالتالى . تبدو رؤوس هذه الكائنات من الخارج كرؤوسنا نحن سكان الأرض . ومع ذلك فإن الأذنين متصلتان احداهما بالاخرى بواسطة قناة صلبة الجدار ذات مقطع دائرى قطره 1 cm ، وفى منتصف هذه القناة تماما يوجد غشاء رقيق يعمل كجلدة الطبلة ويقسم هذه القناة إلى نصفين متساويين . وينتج الاحساس بالصوت لدى هذه الكائنات عند اهتزاز هذا الغشاء . ما الذى يمكن أن تستنتجه عن القدرات السمعية لهذه الكائنات وعن طرق الاتصال اللفظية بينها ؟

مسائل

اعتبر أن سرعة الصوت فى الهواء تساوى 340 m/s ما لم ينص على غير ذلك .

١ – يسمع صوت الرعد بعد 6.0 s من رؤية البرق . بفرض أن سرعة الضوء أكبر كثيرا من سرعة الصوت ، على أى بعد وقع البرق ؟

٢ – لاحظت متسلقة جبال أنها تسمع صدى صوتها من جبل بعيد بعد زمن قدره 4.0 s . على أى بعد يوجد هذا الجبل ؟

٣ – سرعة الصوت فى الماء 1500 m/s . أوجد الانضغاطية الحجمية للماء .

٤ – تحدد الخفافيش مواضع الاشياء فى الظلام بارسال نبضات فوق سمعية وملاحظة كيفية انعكاسها . فإذا كان تردد الموجات فوق السمعية 7×10^4 Hz ، فما هو الطول الموجى للنبضات التى ترسلها الخفافيش ؟

٥ – ماهو التغير المئوى فى سرعة الصوت فى الهواء إذا ارتفعت درجة الحرارة من 0°C إلى 16.5°C ؟

٦ – مجهار معين له فتحة دائرية قطرها 15 cm . افترض أن هذا المجهار يرسل صوتا منتظما إلى الخارج خلال الفتحة بأكملها . فإذا كانت شدة الصوت عند الفتحة 10^{-4} W/m² ، فما هى القدرة التى يشعها المجهار فى صورة موجات ضوئية ؟

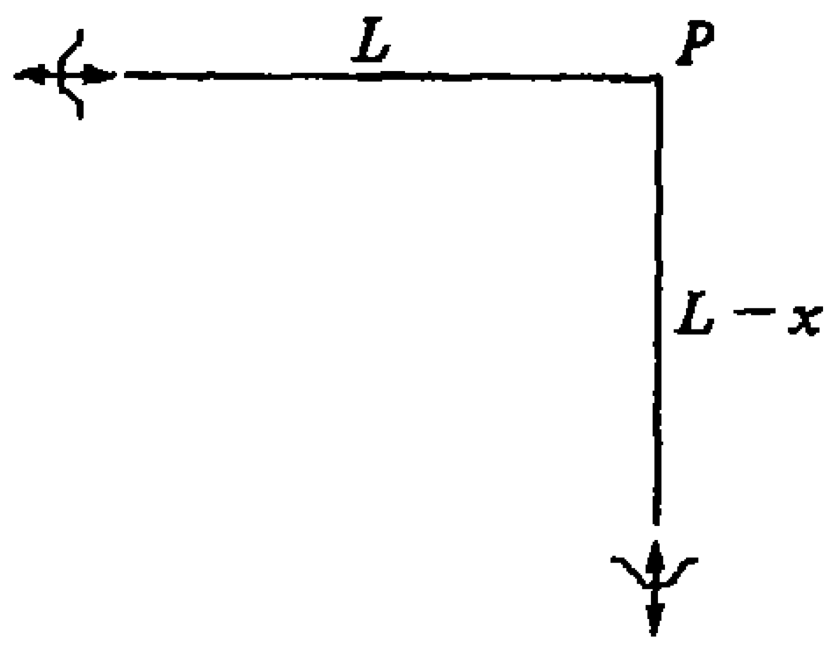
٧* – حزمة من الموجات الصوتية شدتها 2×10^{-5} W/m² . ماهو مستوى شدة الصوت بالديسيبل ؟

٨* – صوتان شدتهما 10^{-6} W/m² و 10^{-9} W/m² . بأى عدد من المرات تعتبر الأذن الصوت الأول اشد من الصوت الثانى ؟

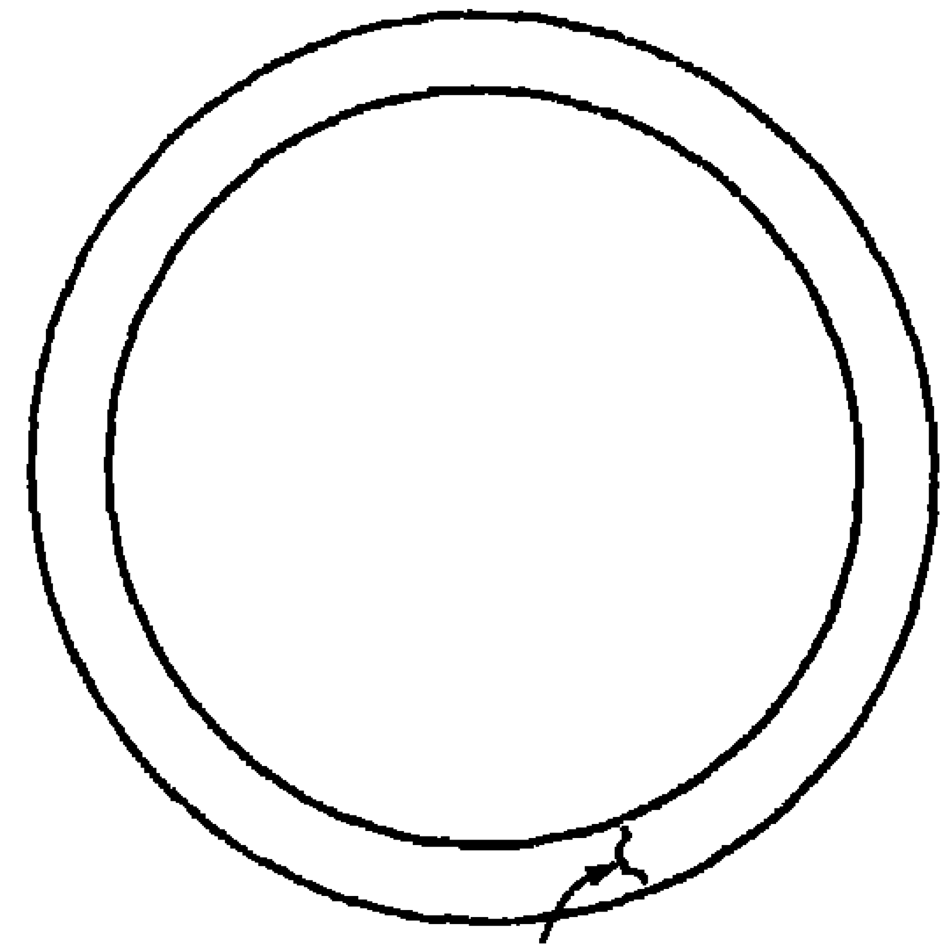
٩* – إذا كانت شدة الصوت تساوى 10^{-4} W/m² على بعد قدره 2.0 m من المصدر ، وإذا كانت شدة الصوت تتناسب عكسيا مع مربع البعد عن المصدر ، (أ) ماهى شدة الصوت على بعد 20.0 m من المصدر ؟ (ب) ماهى النسبة بين مستويى شدة الصوت فى هذين المكانين ؟

١٠ – وضع مجهار صغير فى ماسورة ملتوية على شكل دائرة ومملوءة بالهواء كما هو موضح فى الشكل (م١٥ – ١) . فإذا كان محيط الدائرة هو 12.0m ، فما هى اصغر ثلاث ترددات للمجهار لكى يكون الصوت قويا فى الماسورة ؟

١١ – يرسل المجهاران المبينان فى الشكل م١٥ – ٢ موجتين صوتيتين متماثلتين طولهما الموجى 34cm ، ويهتز المجهاران متفقان فى الطور . (أ) أوجد أقل ثلاث قيم للمقدار x يكون عندها الصوت جهيرا فى النقطة P . (ب) كرر العمل فى حالة سماع أقل صوت عند النقطة P .



شكل م١٥ − ٢



شكل م١٥ − ١

١٢ − اعتبر توافقيات وتر الكمان المبين فى الشكل ١٥ − ٧ . افترض أن التردد الاساسى للاهتزاز 380Hz . ما هى الترددات الرنينية الخمسة التالية باعتبار أن الوتر مثبت جيدا من طرفيه ؟ هل تتساوى هذه الترددات تقريبا مع القيم الموضحة فى الشكل ؟

١٣ − انبوبة طولها 0.75m مفتوحة من أحد طرفيها ومغلقة من الطرف الآخر . ما هى أقل ثلاث ترددات رنينية لها ؟ ارسم شكل الموجة فى الانبوبة لكل تردد .

١٤ − أنبوبة مفتوحة من طرفيها وطولها 0.90m ماهى اصغر ثلاثة ترددات رنينية لها ؟ ارسم شكل الموجه داخل الانبوبة لكل تردد .

١٥ − فى تجربة كالمبينة فى الشكل ١٥ − ١٢ وجد أن الرنين يحدث عندما يكون ارتفاع الماء فى الانبوبة 31.00cm و 41.00cm . فإذا لم يكن هناك أى رنين بين هذين الارتفاعين ، أوجد تردد الشوكة الرنانة .

١٦ − يريد رجل أن يعين عمق سطح الماء فى ماسورة من الحديد تؤدى إلى بئر قديمة ، وباجراء تجربة رنين على هذه الماسورة باعتبارها أنبوبة مغلقة من أحد طرفيها ومفتوحة من الطرف الآخر ، وجد هذا الرجل أن أصغر تردد رنينى هو 80Hz . ما هو عمق سطح الماء عند فوهة الماسورة بالتقريب ؟

١٧ − يبلغ طول نفق لنكولن الذى يمر تحت نهر هدسون فى مدينة نيويورك حوالى 2600m .ماهى الترددات الرنينية له ؟ هل لهذه الترددات أية أهمية ؟ وان كان لها أهمية ، فما هى فى رأيك ؟

١٨ − تردد الاهتزاز الرنينى لانبوبة ارغن عند 0°C هو 500cps . (أ) ما هى قيمة التردد الرنينى لها عند درجة 30° C ؟ يجب أن يتوافق هذا التردد جيدا مع أنبوبة ارغن ترددها 250cps عند 0°C . (ب) هل يكون التوافق جيدا عندما تكون كلتا الانبوبتين فى درجة 30°C ؟ اشرح اجابتك .

١٩ − بأى سرعة يجب أن تتحرك سيارة تجاهك بحيث يبدو تردد نفيرها أكبر بمقدار 10% من تردده عندما يكون ساكنا .

٢٠ − يتحرك مصدر صوتى تردده 100 cps مبتعدا عن مشاهد بسرعة قدرها 18 m/s . فإذا كانت سرعة الصوت 332 m/s ، فما هو تردد الصوت الذى يسمعه المشاهد ؟

٢١ − قورن تردد مجهول بشوكة رنانة قياسية ترددها 2200 cps فوجد أنه يعطى ضربتين فى الثانية . (أ) ماهى القيم المحتملة للتردد المجهول ؟ (ب) كيف يمكنك أن تعين القيمة الحقيقية إذا كان لديك قطعة من اللبان ؟

٢٢ − قارن عازف كمان نغمة صادرة من وتر كمانه بالنغمة المقابلة على البيانو فوجد أن الضربات بين الصوتين تحدث مرة فى كل 3 s . (أ) ماهو الفرق بين عددى الاهتزازات فى الثانية للآلتين الموسيقيتين ؟ (ب) كيف يستطيع عازف الكمان أن يعزف النغمة ذات الدرجة العالية ؟

٢٣ − سرعة الصوت فى الايدروجين تساوى حوالى 1270 m/s . ملأت أنبوبة ارغن ترددها الرنينى الاساسى فى الهواء 800 cps بالايدروجين ، ماقيمة التردد الرنينى الاساسى فى هذه الحالة ؟

٢٤* – أنبوبة طولها 40 cm مغلقة عند احد طرفيها ومفتوحة عند الطرف الآخر . ويحدث الاهتزاز الرنينى فى هذه الانبوبة تحت تأثير مصدر صوتى تردده 210 cps بشرط أن يكون هذا المصدر متحركا بحيث يبتعد عنها . بأى سرعة يجب أن يتحرك المصدر ؟ (اعتبر $v = 320$ m/s) .

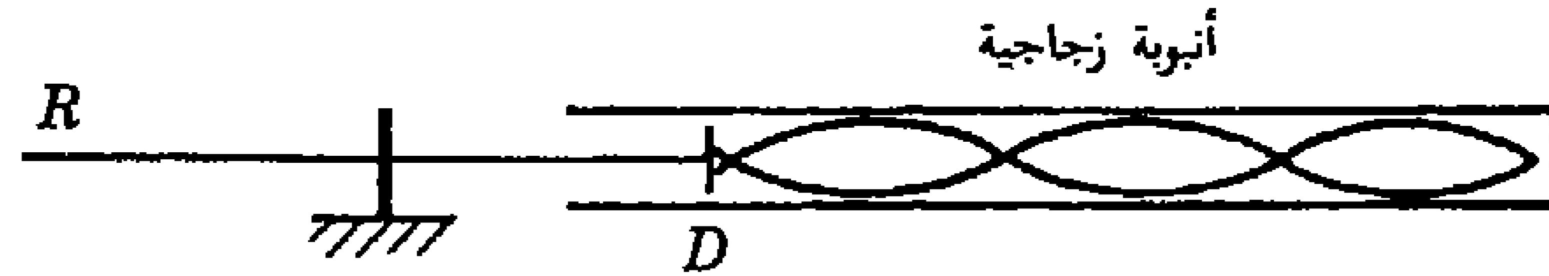
٢٥** – اثبت أن تردد الصوت f' الذى يسمعه رجل يتحرك مقتربا بسرعة قدرها v_m من نفير ساكن تردده f يعطى بالعلاقة :

$$f' = \frac{v + v_m}{v} f$$

أو :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v_m}{v}$$

٢٦** – يستخدم الجهاز المبين فى الشكل م١٥ – ٣ ، وهو يسمى **أنبوبة كونت** ، احيانا لقياس سرعة الصوت فى القضبان المعدنية . عندما يطرق القضيب R فى اتجاه طوله بقطعة من القماش مشبعة بالقلفونية فانه يتحرك حركة اهتزازية طولية رنينية مع تكون بطن عند القرص وعقدة عند نقطة التثبيت . ويرسل القرص D المثبت فى نهاية القضيب موجات صوتية بنفس التردد فى الأنبوبة . وعندما تضبط الأنبوبة فى موضع الرنين ، كما هو مبين فى الشكل ، يبين تراب الفلين فى الأنبوبة مواضع العقد والبطون فى الهواء بوضوح . فإذا وجد أن المسافة بين بطنين متجاورين هى 10.0 cm ، وكان طول القضيب 100.0 m أوجد سرعة الصوت فى القضيب المعدنى .



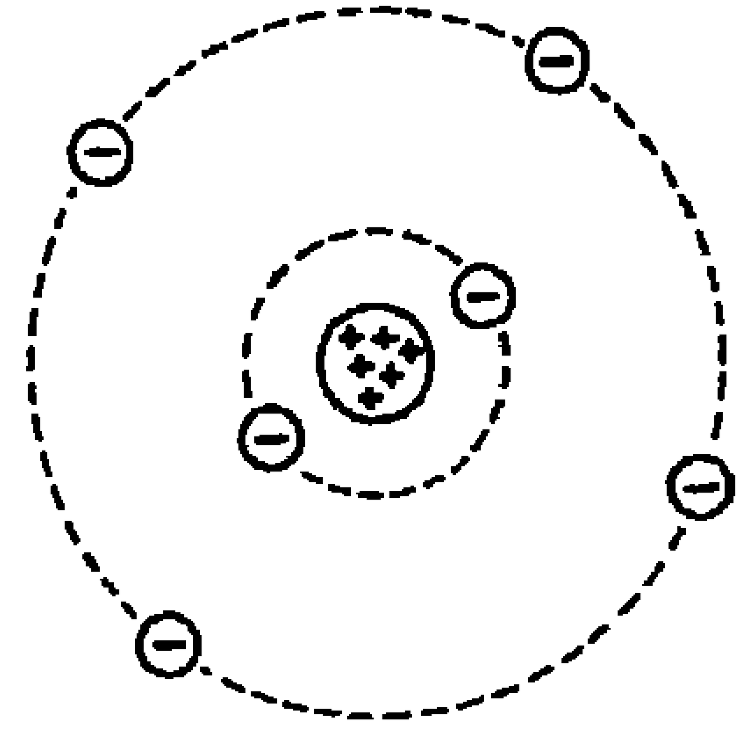
شكل (م١٥ – ٣)

الفصل السادس عشر

الشحنات الكهربية الساكنه
الكهربية الاستاتية

سنبدأ دراستنا للكهرباء بالكهربية الاستاتية ، أو فيزياء الشحنات الكهربائية عند السكون . سنناقش التجاذب والتنافر بين الشحنات ، المجالات الكهربائيه ، وكذا مفهوم فرق الجهد الكهربائى . وسنلاحظ مدى قرب المفاهيم الكهربائية من المبادىء التى درسناها فى الميكانيكا . فقانون حفظ الطاقة سيثبت انه عظيم الأهمية فى الكهرباء كما هو كذلك فيما سبقت دراسته من مجالات الميكانيكا والحرارة . وحين نكمل دراستنا عن الكهرباء الساكنة فاننا سنكون قد أعددنا لبحث سلوك الشحنات المتحركة ، وسيتم عمل هذا فى الفصول التالية .

١٦ – ١ الذرات كمصادر للشحنة*.



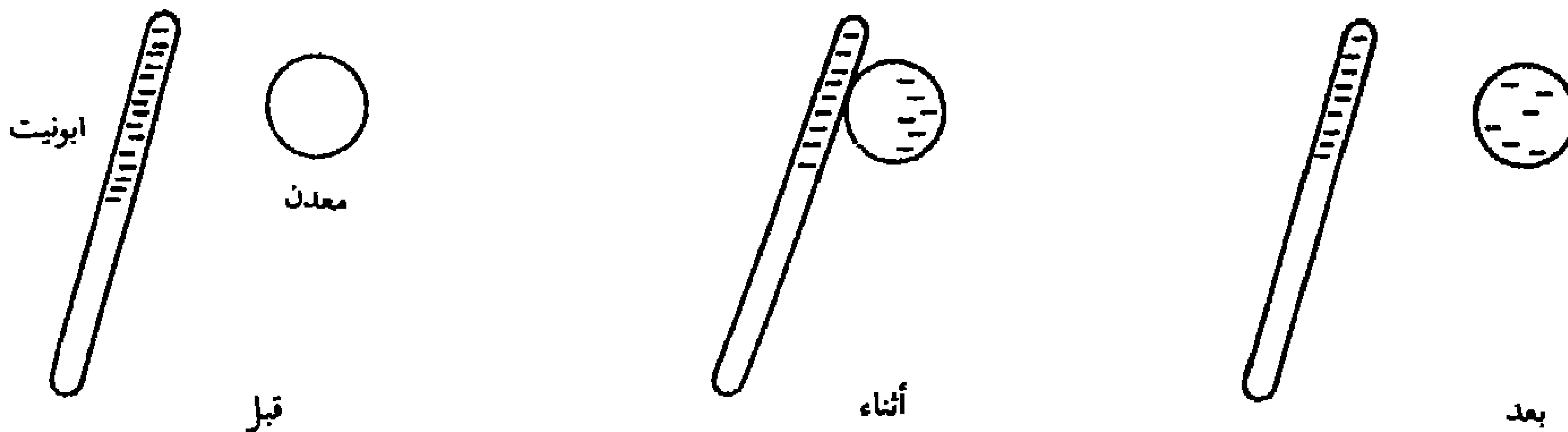
شكل ١٦ – ١.
تمثيل تخطيطى لذرة الكربون. توازن الشحنات السالبة للالكترونات الستة مع الشحنة الموجبة للنواة. (النواة والالكترونات أصغر بكثير عما هو مبين بالشكل).

تتكون الذرة من نواة دقيقة موجبة الشحنة يدور حولها جسيمات سالبة الشحنة تدعى **الكترونات**، ويتمثل هذا فى الرسم التخطيطى لذرة الكربون فى الشكل ١٦ –١. ولاشك أننا نذكر من مقررات الكيمياء أن كل الذرات متعادلة كهربيا، بمعنى أن كمية الشحنات الموجبة على النواة تساوى تماما مجموع شحنات الالكترونات حول النواة. فى حالة ذرة الكربون المبينة، اذا كانت $-e$ هى شحنة كل الكترون، فان الشحنة على النواة يجب أن تكون $+6e$ وسنرجىء المناقشة التفصيلية للذرة إلى فصل قادم وسنكتفى هنا بالتركيب الكهربائى فقط.

وعلى مايبدو فالكون كله يعتبر تقريبا، ان لم يكن تماما متعادلاً من وجهة النظر الكهربائية. والأرض عليها فائض قليل جدا من الشحنات الموجبة أو السالبة (وقد لايوجد فائض). ومن الناحية العملية يمكن اعتبار أن الأرض ليس عليها شحنات فائضة. والأغلبية الساحقة للشحنات على الأرض أو بداخلها تبقى كمكونات للذرات. وحين توجد شحنات طليقة، سالبة أو موجبة، فانها تعتبر منتزعة من ذرات معينة.

وفى الواقع فانه ليس من الصعوبة فى شىء ان يزال الكترون من ذرة ماتحت ظروف معينة. فاذا حككنا، مثلا، عمودا من الابونيت (المطاط الصلب) بفراء حيوانى، فان بعض الالكترونات من ذرات مادة الفراء تنفصل لتلتصق بعمود الابونيت. (ليس من السهل شرح السبب فى انتقال الشحنات الذى حدث ويمكن دراسة هذا الموضوع فى مقررات تتناول فيزياء الجوامد). أى أن عمود الابونيت قد اكتسب فائضا صافيا من الالكترونات، وحين يحك العمود بجسم معدنى، فان عددا من الالكترونات الزائدة تنتقل الى المعدن، كما هو موضح فى شكل ١٦ – ٢.

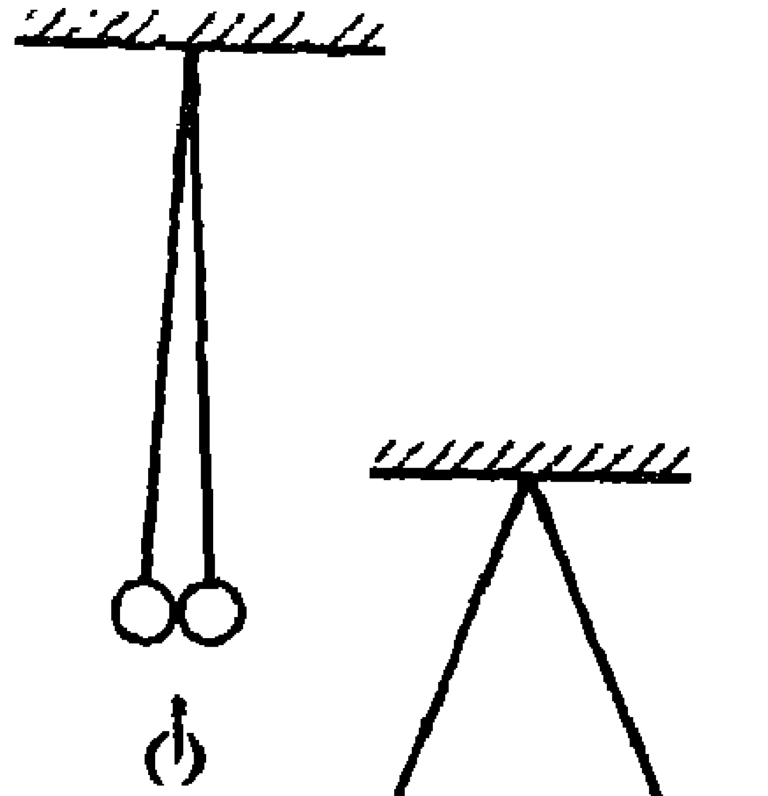
شكل ١٦ – ٢
عندما يلمس عمود الابونيت ذى الشحنة السالبة الكرة المعدنية غير المشحونة، فان الالكترونات تنفصل بالتوصيل من العمود الى الكرة.



* تعتبر مادة هذا الفصل أساسية لدراسة الكهرباء برمتها وكذا لجميع جوانب الطبيعة التى تنطوى على تأثيرات كهربائية لذا .فمن المحتم فهم هذه المادة جيدا قبل الانتقال الى دراسة الفصول التالية.

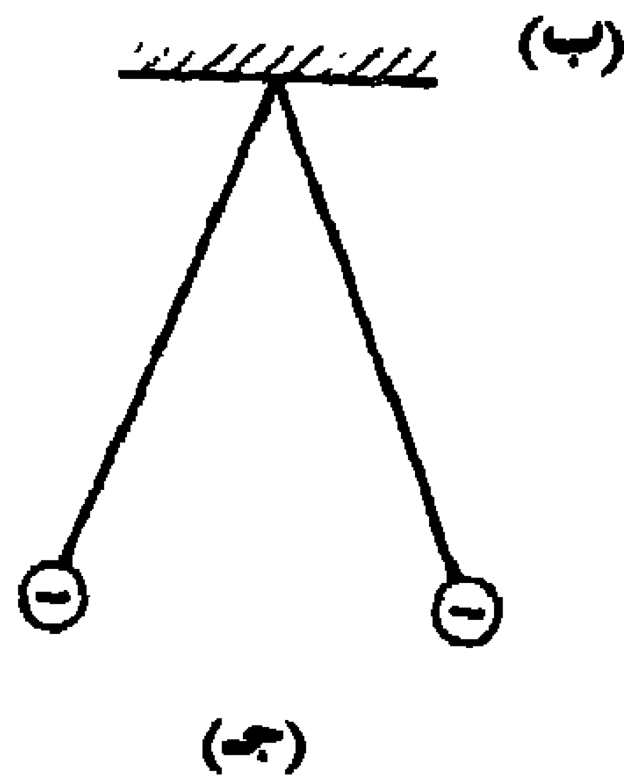
وبالمثل ، حين يحك عمود زجاجي بالحرير فان بعض الالكترونات تغادر ذرات الزجاج وتؤدى الى ظهور الفائض من الالكترونات على الحرير . ومن الطبيعي أن العمود الزجاجي قد أصبح لديه الآن فائض من الشحنات الموجبة . اذا لمس العمود الزجاجي كرة معدنية متعادلة فان الالكترونات تغادر بعض ذرات المعدن لتحل محل الالكترونات التى فقدتها الذرات الموجودة فى العمود الزجاجي . وكنتيجة لهذا تكتسب الكرة المعدنية شحنة موجبة صافية . ويؤدى احتكاك كثير من المواد بعضها البعض الى فصل الشحنات . وقد استخدمت الحالات التى وصفناها الآن لتعريف الشحنات الموجبة والسالبة من قبل أن يعرف بوجود الالكترون .

نوعـــان من الشحنـــة

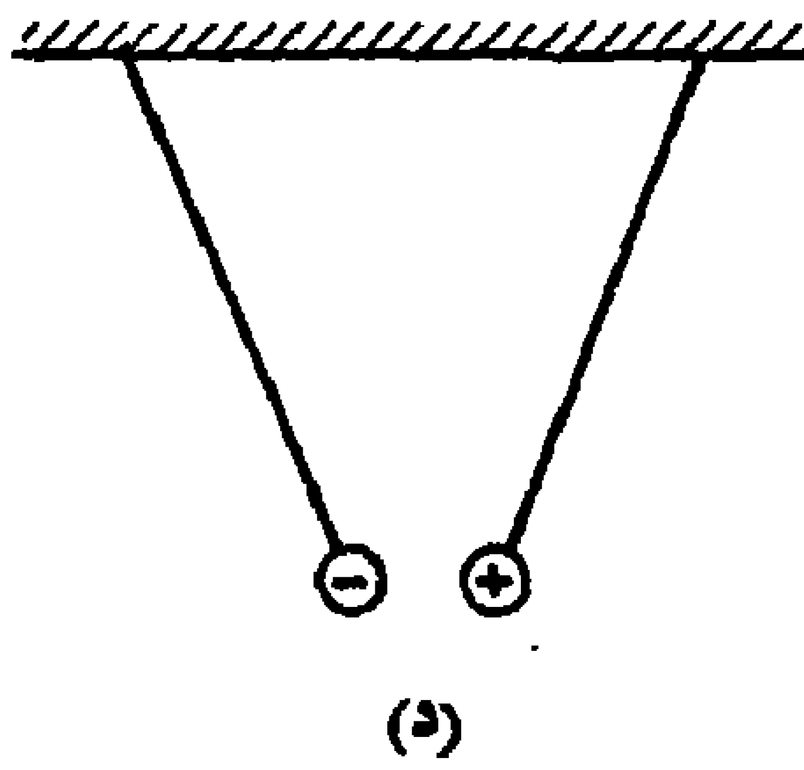


(أ)

(ب)



(جـ)



(د)

شكل ١٦ – ٣
تبين كرات النخاع المشحونة كيف أن الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض بينما تتجاذب الشحنات المختلفة مع بعضها البعض .

١٦ – ٢ القوى بين الشحنات

الآن وقد عرفنا كيف نحصل على اجسام مشحونة ، أصبح من الممكن فحص القوى الموجودة بين الشحنات ، وأحد أبسط الطرق لعمل هذا هو بالاستفادة من كرات النخاع الدقيقة وهى كرات خفيفة جدا ، مغطاة بدهان معدنى . ومن السهل شحن هذه الكرات باستخدام سيقان من الزجاج أو الابونيت . اذا علقت الكرات بخيوط خفيفة فان أربع تجارب شيقة يمكن أن تجرى ، وهى موضحة فى الاشكال ١٦ – ٣أ الى د .

ومن النتائج العملية الموضحة فى شكل ١٦ – ٣ نستنتج التالى :

١ – تتنافر الشحنات المتشابهة بمعنى أن شحنتين موجبتين تتنافران وكذا تفعل شحنتان سالبتان .

٢ – تتجاذب الشحنات المختلفة أى أن الشحنات الموجبة تجذب السالبة والعكس بالعكس .

٣ – مقدار القوة الكهربائية بين جسمين مشحونين يزيد دائما على قوى التجاذب بين الجسمين (كيف يمكن للتجارب أن توضح هذه الحقيقة ؟)

١٦ – ٣ العوازل والموصلات

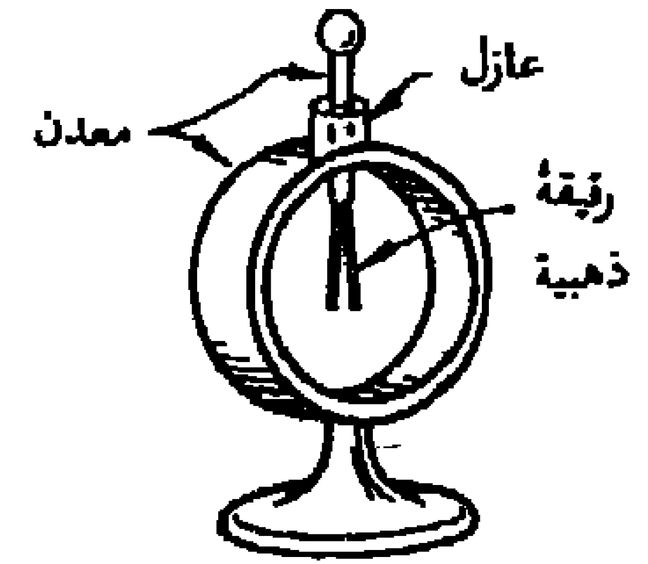
على الرغم من أن كل المواد تتركب من ذرات وأن كل الذرات تتكون من الكترونات ونوى الا أننا جميعا نعلم مدى تفاوت الخواص الكهربائية للمواد . هناك مجموعتان رئيسيتان يمكن أن تنقسم اليها كل المواد حسب خواصها الكهربائية ، وهاتان هما مجموعة الموصلات ومجموعة غير الموصلات أو العوازل* .

---

*حين تقع المواد فى الوسط بين هاتين المجموعتين فانها تسمى أشباه الموصلات . وبعض الناس يميلون الى تصنيفهم كمجموعة مستقلة .

فى المجموعة الثانية ، العوازل ، تكون الكترونات كل ذرة على ارتباط وثيق بها ولاتقدر على التجوال داخل المادة . ولذا فانه حتى لو وضع مزيد من الشحنات بالقرب من نهاية عمود من مادة عازلة ، فان الالكترونات فى الذرات المجاورة لن تستطيع الحركة تحت تأثير التجاذب أو التنافر مع الشحنات المجاورة ، فهذه الالكترونات مرتبطة بشدة مع ذراتها ولاتقدر على التحرر وعليه لاتوجد حركة كبيرة للشحنات داخل العمود .

أما الموصلات فسلوكها مختلف تماما ، فالالكترونات الموجودة بالقرب من الجزء الخارجى للذرة وتسمى **الكترونات التكافؤ** ، تقع بالقرب من الذرات المجاورة بحيث يصبح من الصعب تحديد انتماء الكترون مالى ذرة مابدقة . وتحت هذه الظروف تقوم الكترونات التكافؤ بالحركة خلال المعدن ويمكن أن ينظر اليها فى بعض الأغراض على الأقل – على أنها تكون غازا الكترونيا محبوسا داخل حدود قطعة المعدن . وحتى فى المعادن فانه فيما عدا الالكترونات القريبة من خارج الذرة والتى تعتبر طليقة ، فإن اغلب الالكترونات مرتبطة بشدة مع الذرات ، والكترونات التكافؤ التى يمكن اعتبارها طليقة تكون عادة الكترونا أو اثنين أو ثلاثة فى كل ذرة .



شكل ١٦ – ٤
أحد أنماط المكشاف الكهربى (الالكتروسكوب) ذى الورقة الذهبية . يتكون الجزء المركزى من كرة معدنية ، قضيب معدنى وأوراق من رقائق الذهب ، وهذا الجزء معزول عن العلبة .

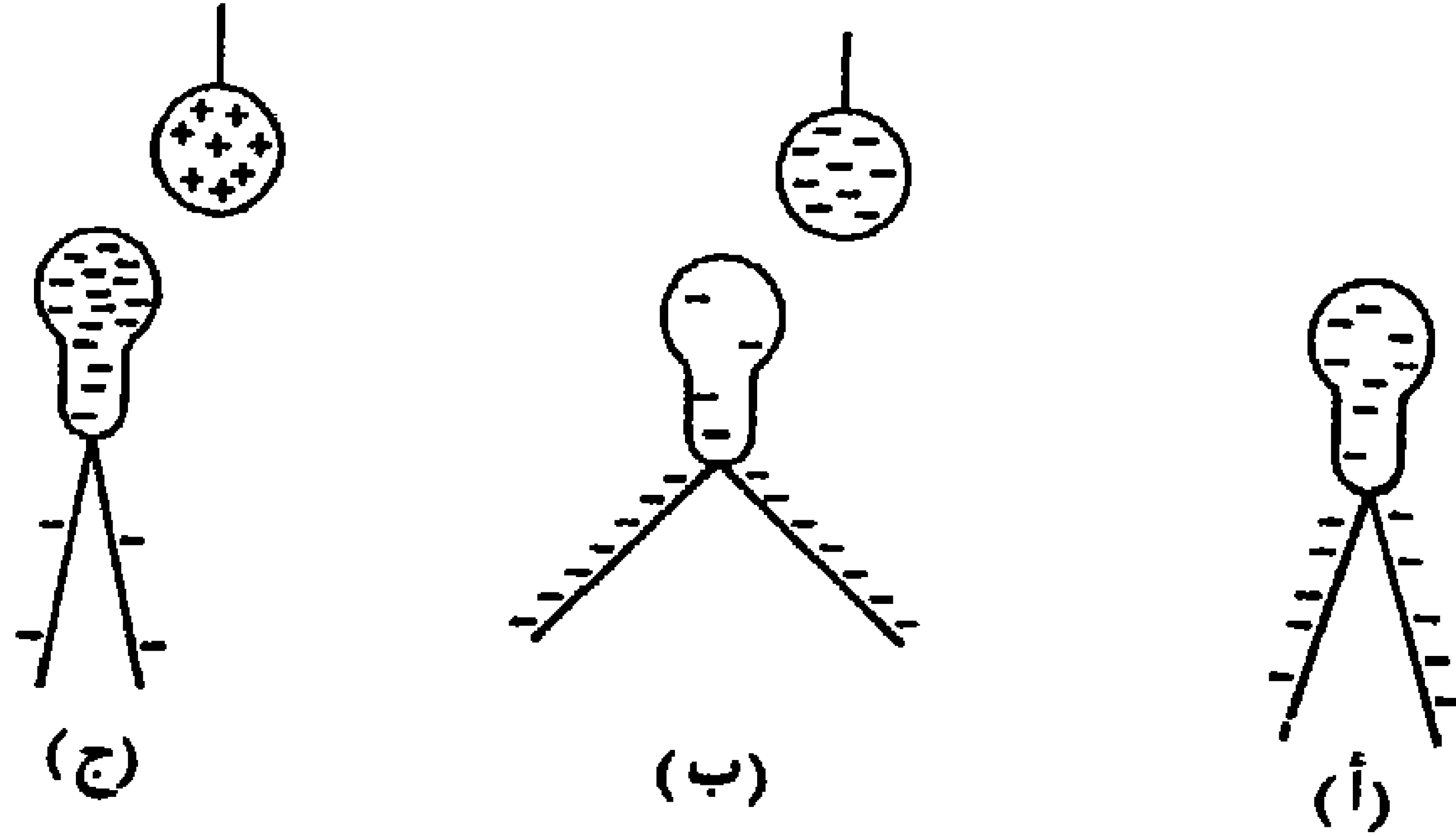
يجب أن ندرك أن الصياغة المتقنة لحركة الشحنات بداخل الجوامد تعتبر مشكلة معقدة جدا ، ويمكن تناولها باستخدام ميكانيكا الكم . يعتبر السوك الحقيقى للالكترونات داخل الجوامد مجالا نشطا للبحث حتى يومنا هذا ، وعلى الأخص بالنسبة للمواد التى تعتبر وسطا بين الموصلات وغير الموصلات أو ماتسمى أشباه الموصلات .

١٦ – ٤ المكشاف الكهربى (الالكتروسكوب)

يعتبر المكشاف أداة بسيطة تستخدم فى قياس شحنات ضئيلة القيمة ، ويوضح الشكل ١٦ – ٤ نموذجا له . هناك قضيب معدنى معلق بطرفه ورقتان رقيقتان جدا من رقائق الذهب يثبت القضيب المعدنى داخل علبه معدنية بواسطة عازل يمنع تلامس القضيب بالعلبة المعدنية . يغطى وجهان من اوجه العلبة المعدنية بالزجاج حتى يمكن رؤية الوضع الذى تتخذه رقائق الذهب .

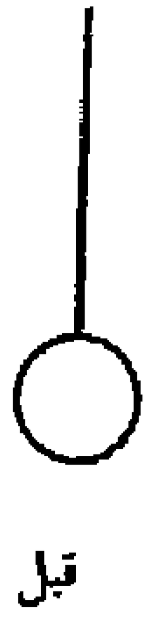
لنفرض أن بعض الشحنات السالبة قد وضعت على القضيب المركزى وذلك بملامسته مع قطعة مشحونة من الابونيت . والشحنة تكون وقفا على القضيب والرقائق تماما حيث انهم معزولون عن بقية الأشياء . ولما كانت الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض ، فان الشحنات السالبة ستقوم بتوزيع نفسها بشكل منتظم على القضيب والرقائق الذهبية . على أن حرية حركة الوريقات الذهبية فى أن تنحنى يجعلها

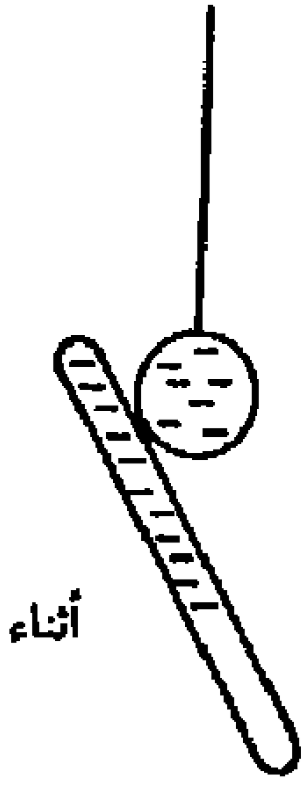
تتباعد نتيجة للشحنات الموجودة عليها متخذة بذلك الوضع الموضح فى الشكل ١٦ — ٥أ .

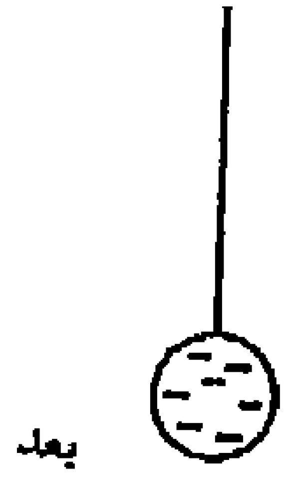


شكل ١٦ — ٥
يستخدم المكشاف الكهربائى المشحون لتعين الاشارة والقيمة التقريبية للشحنة الموجودة على جسم ما .

لو أن كرة مشحونة سالبة اقتربت من كرة المكشاف الكهربى كما هو موضح فى الشكل ١٦ — ٥ ب فان كثيرا من الشحنات السالبة التى على القضيب ستتدافع الى أسفل مسببة مزيدا من التباعد بين الرقائق الذهبية . ويحدث العكس تماما اذا اقتربت كرة مشحونة موجبة من كرة المكشاف الكهربى (الشكل ١٦ — ٥ جـ) . وبالاضافة الى هذا فان كرة غير مشحونة لن تؤدى الى تأثير يذكر اذا اقتربت من المكشاف الكهربى . ويمكننا باستخدام هذا الجهاز تعيين اشارة الشحنة وتقدير قيمتها التقريبية . وعليك الآن أن تقنع نفسك أن اجراء مشابها يمكن تتبعه لو أن المكشاف الكهربائى كان مشحونا بشحنة موجبة .







شكل ١٦ — ٦
يمكن شحن كرة معدنية بواسطة التوصيل ، تلاحظ أن الشحنة قد قسمت وأن كل من الكرة والقضيب لهما نفس نوع الشحنة .

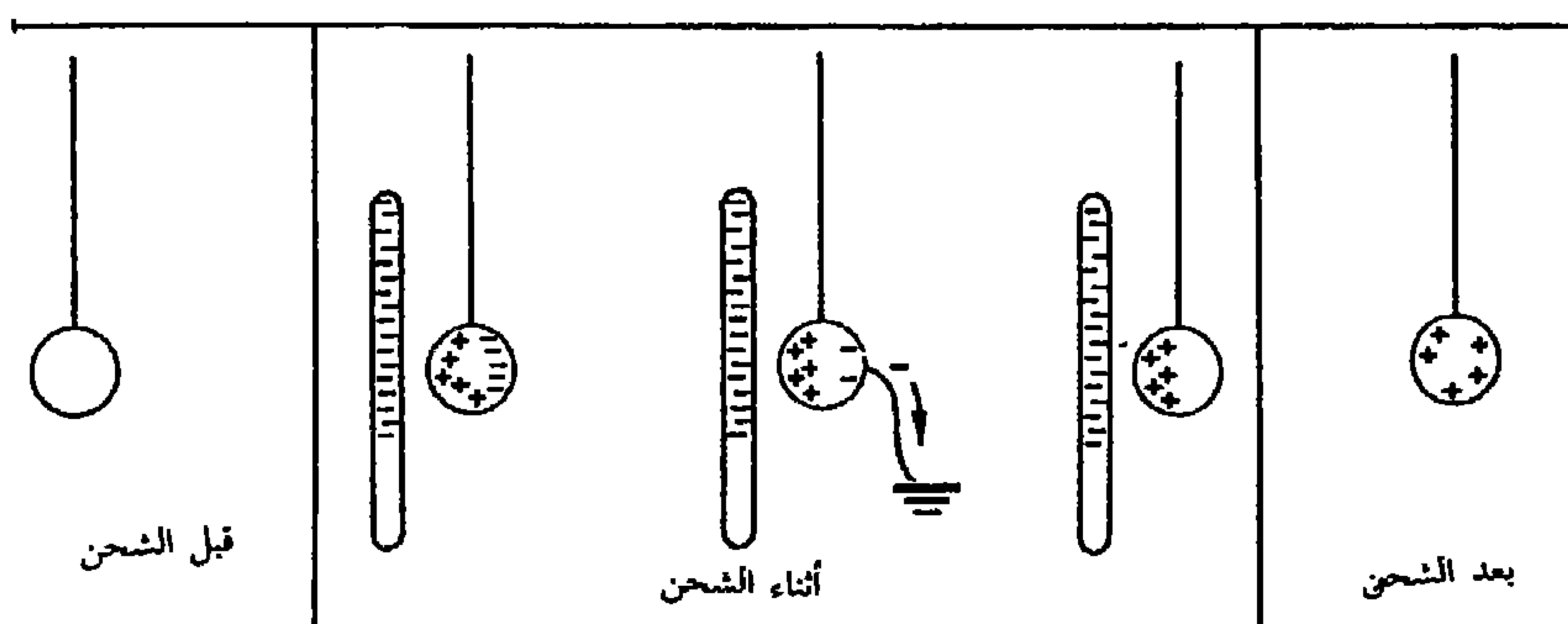
١٦ — ٥ الشحن بالتوصيل وبالحث

هناك طريقتان عامتان لوضع شحنات على جسم معدنى باستخدام جسم ثان سبق شحنه . وكمثال محدد ، اعتبر مسألة شحن كرة معدنية باستخدام قضيب من الابونيت مشحون بشحنة سالبة.يمكننا شحن الكرة وذلك بلمسها بالقضيب بكل بساطة ، وعند التلامس تنتقل بعض الشحنات السالبة الفائضة من القضيب الى الكرة . ويوضح الشكل ١٦ — ٦ هذه العملية المسماة « **الشحن بالتوصيل** »

يستخدم نفس القضيب بطريقة أخرى لشحن الكرة كما هو موضح فى شكل ١٦ — ٧ يتم هنا شحن الكرة **بالحث** حيث لايقوم القضيب بلمس الكرة على الإطلاق . نلاحظ أنه حين يقترب القضيب من الكرة فإن بعض الإلكترونات الموجودة فى المعدن تتنافر الى الجانب الأيمن من الكرة مخلفة شحنة موجبة على الجانب

الأيسر ، ولما كنا لم نضف أو نأخذ شحنات من الكرة فإنها تظل متعادلة بالطبع . والآن لنفرض أن الكرة لمست بواسطة جسم آخر كإصبع إنسان مثلا . (يقال لهذه الحالة أن الكرة قد **وصلت بالأرض** (أرضت) ، والرمز المستخدم لبيان هذه العملية هو ⫞) ويمكن ازالة الشحنات السالبة بعيدا عن القضيب اذا سمح لها بالسريان خلال الجسم الذى لمس الكرة ، فإذا حدث هذا فإن الكرة لاتعود متعادلة حيث أنها قد فقدت بعضا من شحناتها السالبة . والآن بعد إزالة الجسم الذى لمس الكرة ، يمكن أبعاد القضيب أيضا وتصبح الكرة مشحونة بشحنة موجبه . (لماذا وجب أن يبعد الجسم اللامس أولا ثم القضيب بعد ذلك ؟)

عند مقارنة الشكلين ١٦ — ٦ ، ١٦ — ٧ فإننا نجد أن قضيبا من الابونيت يمكن أن يستخدم فى شحن جسم معدنى بشحنه سالبة بالتوصيل ويمكنه شحن نفس الجسم بشحنة موجبة بالحث . قد يكون من الشيق بالنسبة لك أن ترسم أشكالا مشابهة باستخدام قضيب زجاجى مشحون بشحنة موجبة ، حيث تكون الشحنات ذات إشارة معاكسة فى هذه الحالة .



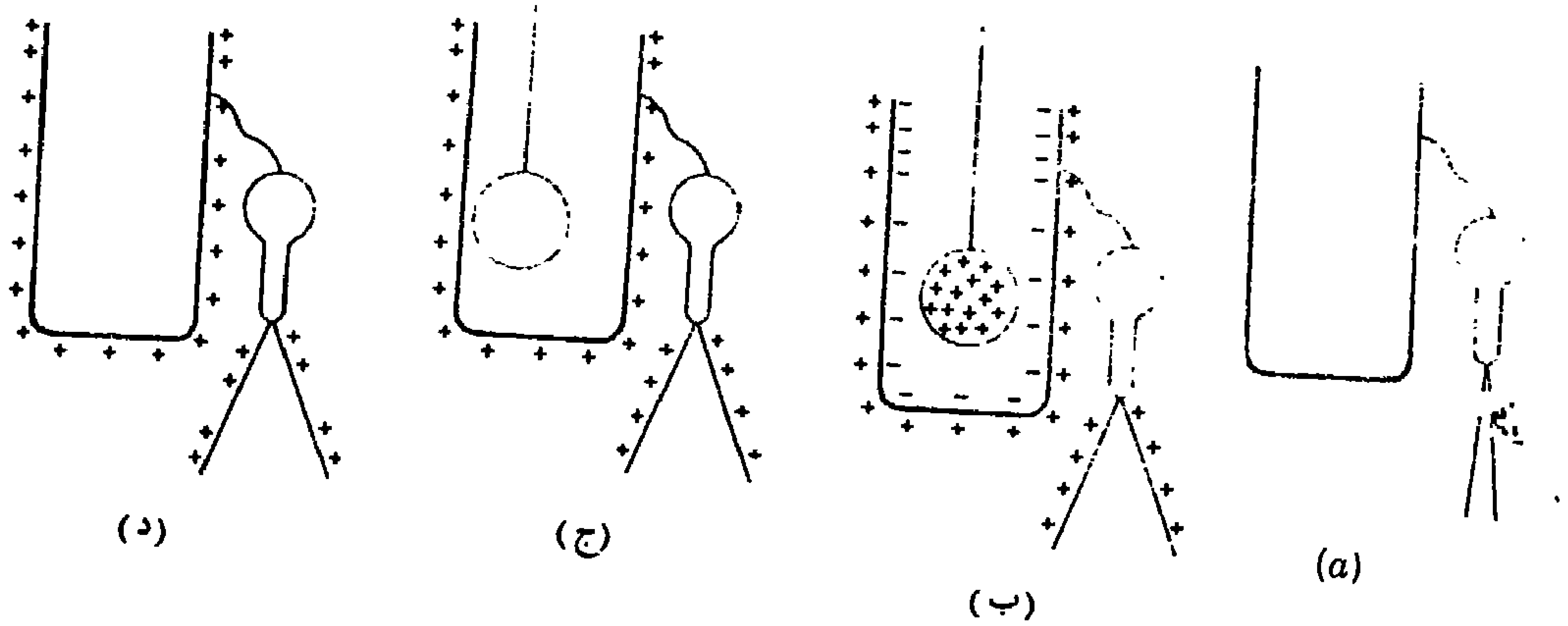
شكل ١٦ — ٧
طريقة اعطاء كرة معدنية شحنة موجبة بالحث . نلاحظ أن القضيب والكرة لهما شحنات مختلفة

١٦ — ٦ تجربة دلو الثلج لفاراداى

فى عام ١٨٤٣ أجرى مايكل فاراداى لأول مرة تجربة بسيطة ولكنها مفيدة للغاية إذ أوصل دلوا معدنيا للثلج بمكشاف كهربائى كما موضح فى الشكل ١٦ — ٨أ . علقت بعد ذلك كرة معدنية بخيط ثم اعطيت شحنة موجبة وتركت لتتدلى داخل الدلو (بدون أن تمس جدرانه) فلوحظ أن وريقات الذهب فى المكشاف قد تباعدت . والاكثر من هذا أن حركة الكرة من مكان الى آخر داخل الدلو لم تغير من وضع الوريقات الذهبية فظلت منفرجة . ولم تعد الوريقات الى وضعها الأصلى إلا حين أبعدت الكرة من داخل الدلو .

---

*حين يراد توصيل جسم بالأرض فهو يوصل عادة بأنبوبة المياه أو بجسم مدفون فى الأرض بحيث أن أية شحنة فائضة تسرى الى الأرض ، أى الى الكرة الأرضية .



شكل ١٦ – ٨
تجربة دلو الثلج لفاراداى

وقد لاحظ فاراداى أيضا أن الكرة المعدنية المشحونة اذا لمست جدار الدلو فإن وريقات المكشاف تظل كما هى منفرجة مثلما كانت قبل اللمس ، فإذا أبعدت ، الآن الكرة المعدنية من الدلو فان الوريقات لاتعود الى وضعها الأصلى وتظل منفرجة . وحين تقرب الكرة المعدنية بعد ذلك من مكشاف آخر فانها توجد غير مشحونة على الأطلاق . وعلى مايبدو ، فان لمس الكرة لجدار الدلو الداخلى قد جعل الشحنة الفائضة على الكرة تتعادل تماما . ولما كانت وريقات المكشاف متصلة بالجدار الخارجى للدلو ولم تتحرك حين لمست الكرة الجدار الداخلى ، فإن فاراداى قد استنتج أن الوجه الداخلى للدلو كان لديه من الشحنات ماهو كاف لمعادلة الكرة .

من هذه التجارب يمكننا الوصول الى الاستنتاجات التالية ، والموضحة بالأشكال ١٦ – ٨ ب الى د .

١ – عند تعليق جسم معدنى مشحون بداخل وعاء معدنى متعادل فإن هذا يؤدى الى ظهور شحنات بالحث مساوية ومعاكسه على الجدار الداخلى للوعاء .

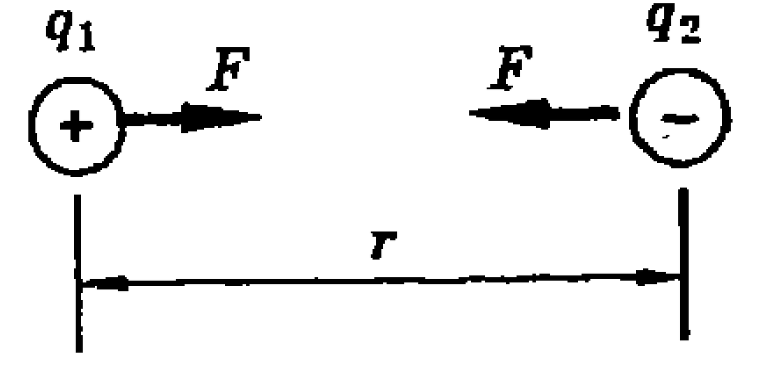
٢ – اذا لمس الجسم المعدنى المشحون الجدار الداخلى للوعاء فإن الشحنة التى ظهرت بالحث تعادل تماما الشحنات الفائضة على الجسم المعدنى .

٣ – اذا وضع جسم مشحون داخل وعاء معدنى ، فإن شحنة مساوية وذات نفس الإشارة تظهر على السطح الخارجى للوعاء .

٤ – حين يتوفر مسار للتوصيل فإن كل الشحنات الموجودة على الجسم المعدنى تستقر على سطحه الخارجى .

١٦ - ٧ قانون كولوم

لقد صيغ القانون الرياضى الذى يعبر عن تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب الشحنات المختلفة عام ١٧٨٥ بواسطة شارل أوجستين دى كولوم (١٧٣٦ - ١٨٠٦) وسمى بقانون كولوم . وقد أستخدم ميزان حساس جدا ، شبيه بذلك الذى استخدمه كافندش لدراسة الجاذبية ، لقياس القوة بين كرتين صغيرتين مشحونتين بدقة.وكنموذج على الموقف نرى الشكل ١٦ - ٩ هناك كرتان صغيرتان ، أصغر بكثير عما هو موضح ، تبعدان مسافة r بين مركزيهما ، وتحملان الشحنات $+q_1$ $-q_2$ وقد استنتج كولوم ، بعد عدد من التجارب أن القوة المؤثرة على الكرة 1 تتناسب طرديا مع حاصل ضرب الشحنتين وعكسيا مع مربع المسافة بينهما . وبالرموز



شكل ١٦ - ٩
الشحنتان المختلفتان ، غير المتساويتين تجذبان بعضهما البعض بقوة متساوية .

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

أو

$$F = (\text{const})\left(\frac{q_1 q_2}{r^2}\right) \qquad ١٦ - ١$$

وتكون القوة فى الإتجاه الموضح فى شكل ١٦ - ٩ . وحسب قانون الفعل ورد الفعل لنيوتن فإن القوة المؤثرة على الكرة 2 كانت مماثلة فى المقدار ولكنها مضادة فى الإتجاه . نلاحظ أن قانون كولوم ينطبق فقط فى حالة الشحنات النقطية ، فإذا كانت الشحنات ممتدة فوق منطقة كبيرة فان المسافة r بين الشحنات لايصبح من السهل تحديدها .

يعتمد المقدار الثابت فى قانون كولوم على الوحدات المستخدمة لكل من الكميات الطبيعية الموجودة فى المعادلة . وقد استخدم نظام للوحدات يجعل هذا المقدار الثابت مساويا الوحدة لعدة سنوات ولكن النظام لم يكن - للأسف - هو نفسه المستخدم فى التطبيقات الكهربائية العملية ، كما انه لم يكن ينتمى الى نظام (الوحدات الدولية) SI . وللتغلب على هذه الصعوبات فإن علينا أن نستخدم ثابتا للتناسب فى قانون كولوم يكون أكثر تعقيدا . وهذا التعقيد يتيح لنا أن نستخدم كلا من نظام SI للوحدات وكذا الوحدات الكهربائية الشائعة (أو العملية).وبناء على هذا فإننا نستخدم وحدة للشحنات هى الكولوم (C) التى سنعرفها بدقة فيما بعد بدلالة القوى الموجودة بين التيارات الكهربائية . ولدينا الآن الشكل التالى **لقانون كولوم** ،

قانون كولوم

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad ١٦ - ٢$$

حيث F مقاسة بالنيوتن ، r بالمتر ، q بالكولوم أما $k = 8.9874 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2$
وسنقوم فى معظم حسابات هذا الكتاب بجعل $k = 9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$

أصغر الشحنات

للحصول على احساس بحجم وحدة الشحنات وهى الكولوم فإن الحقائق التالية يجب أن تلاحظ.إن مقدار الشحنة على الإلكترون والبروتون تعتبر كسرا صغيرا من الكولوم $1.60219 \times 10^{-19}C$ ولم يمكن أبدا ايجاد شحنة أصغر من هذه القيمة بل إنه ليست هناك شحنة دون أن تكون مضاعفات صحيحة لهذا الكم من الشحنة الأساسية ، لذا فنحن نعتقد أن كل الشحنات تتكون من مضاعفات هذه القيمة الأساسية . على أن كرات النخاع الصغيرة حين تشحن قد تحمل شحنات فائضة تقدر بالميكروكولوم $10^{-6}C$ أو $1\ \mu C$ أى أن تلك الكرات قد تحمل مليون مليون من كمات الشحنة ، وكم الشحنة يمثل بالرمز e وهو

$$e = 1.60219 \times 10^{-19}\ C$$

والشحنة التى يحملها الالكترون وهى $-e$ سالبة بينما شحنة البروتون $+e$

مثال توضيحى ١٦ - ١ يزن « بنس » نحاسى حوالى 3g ويحتوى على حوالى 3×10^{22} ذرة نحاس . افترض أن بنسين وضعا على مسافة 2.0 m بعيدا عن بعضهما البعض وكان كل منهما يحمل شحنة مقدارها q . أ) فما مقدار الشحنة q إذا كانت قوة التنافر التى يؤثر بها أحدهما على الآخر تساوى وزن البنس ؟ (ب) ماعدد الالكترونات التى يجب أن تزال من البنس حتى يكتسب تلك الشحنة ؟ (جـ) ماهى نسبة عدد الذرات التى فقدت الكترونات فى مثل تلك الحالة ؟

طريقة الحل : أ) يوضح الشكل ١٦ - ١٠ الموقف المطروح . كتلة البنس الواحد هى 3g أو $3 \times 10^{-3}Kg$. وزن البنس هو mg أو 0.0294 N . ينص قانون كولوم على أن $F = kq_1q_2/r^2$ ولذا فقوة التنافر لاحد البنسين هى :

$$F = (9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)\frac{q^2}{(2.0\ m)^2}$$

حيث $F = 0.0294$ N فى هذه الحالة . واذا أوجدنا q فانها تساوى $3.6 \times 10^{22}C$

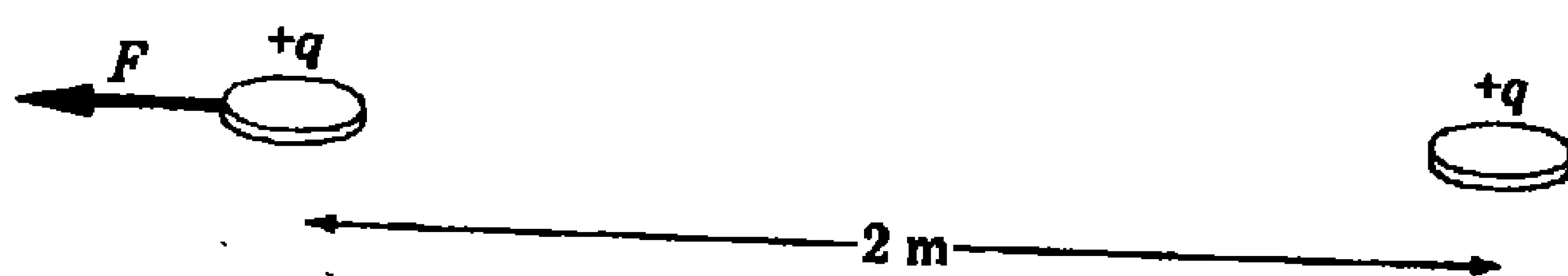
(ب) عندما يزال الكترون من البنس فإنه يخلف وراءه شحنه غير متزنة موجبة قدرها 1.6×10^{-6} ، وعليه فعدد الالكترونات التى أزيلت يجب أن يكون :

$$\text{عدد الالكترونات} = \frac{3.6 \times 10^{-6}\ C}{1.60 \times 10^{-19}\ C} = 2.3 \times 10^{13}$$

جـ) حيث أن كل بنس يحتوى على $3 \times 10^{+22}$ ذرة لذا فكسر الذرات التى فقدت الكترونا منفردا يكون :

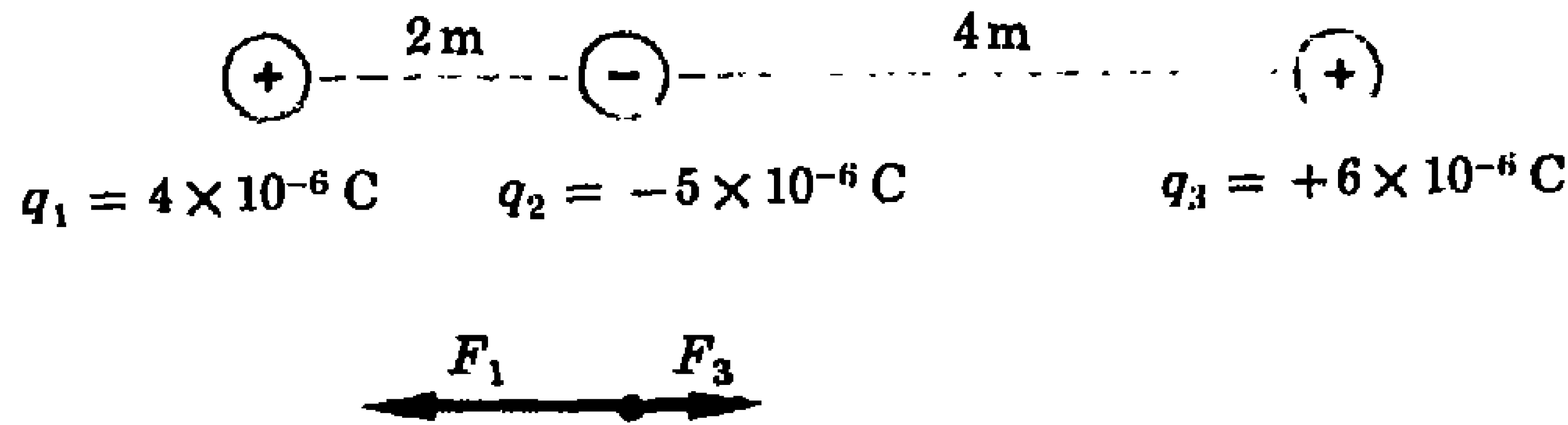
$$\text{الكسر} = \frac{2.3 \times 10^{13}}{3 \times 10^{22}} = 7.7 \times 10^{-10}$$

شكل ١٦ - ١٠
كما هو موضح فى المثال التوضيحى ١٦ - ١ فإن كسرا صغيرا من الإلكترونات تلزم ازالته من البنس حتى يبيح ظهور قوة كهربية كبيرة .



لاحظ أن كسرا صغيرا جدا من الالكترونات وجبت إزالته حتى نعطى الجسم شحنة ملموسة ولاحظ أيضا أن شحنات تبلغ من الضآلة $10^{-6}C$ كافية لخلق قوى محسوسة يمكن قياسها بين أجسام ذات احجام معتادة .

مثال توضيحى ١٦ – ٢ إوجد القوة المؤثرة على مركز الشحنة المرسومة فى شكل ١٦ – ١١ .



شكل ١٦ – ١١
تنجذب الشحنة المركزية الى q_1 بقوة قدرها F_1 والى الشحنة q_3 بقوة قدرها F_3 .

طريقة الحل : من الواضح أن الشحنة q_2 ستنجذب الى q_1 بقوة قدرها F_1 وتنجذب أيضا الى الشحنة q_3 بقوة F_3 . باستعمال قانون كولوم ، نجد أن :

$$F_1 = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 0.0450 \text{ N}$$

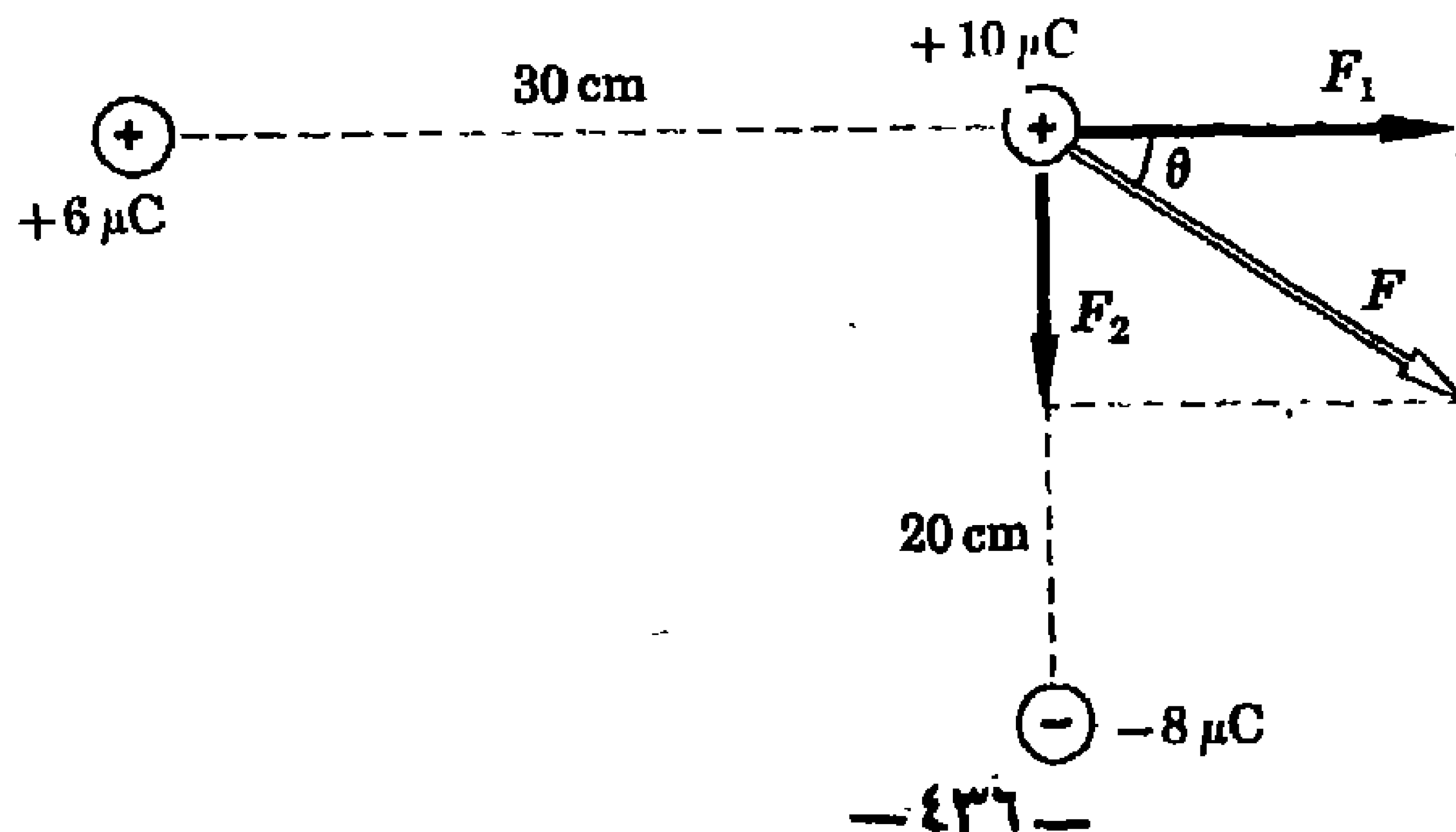
$$F_3 = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-6} \text{ C})(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 0.0169 \text{ N}$$

وتكون القوة الكلية المؤثرة على q_2 الى اليسار :

$$F = F_1 - F_3 = 0.0281 \text{ N}$$

يلاحظ أن اشارات الشحنات لم تستخدم حين طبقنا قانون كولوم وذلك لأنها متضمنة فى اتجاهات القوى ، ويمكننا هذا من خساب مقدار القوة باستعمال قانون كولوم ثم الاشارة بواسطة رسم اتجاهى الى أى الاتجاهات يكون موجبا وايها سالبا .

مثال توضيحى ١٦ – ٣ . اوجد القوة المؤثرة على الشحنة $+10\text{-}\mu C$ فى الشكل ١٦ – ١٢ .



شكل
شكل ١٦ – ١٢
لايجاد القوة المحصلة التى تؤثر على الشحنة $+10\text{-}\mu C$ فاننا يجب أن نضيف القوتين المنفصلتين التى تؤثر بهما الشحنتان الأخريان عليها .

طريقة الحل : نرسم القوى المؤثرة على الشحنة المذكورة . باستخدام قانون كولوم ، $F = kq_1q_2/r^2$ فإننا نجد بسهولة أن :

$$F_2 = 18\text{ N} \qquad F_1 = 6\text{ N}$$

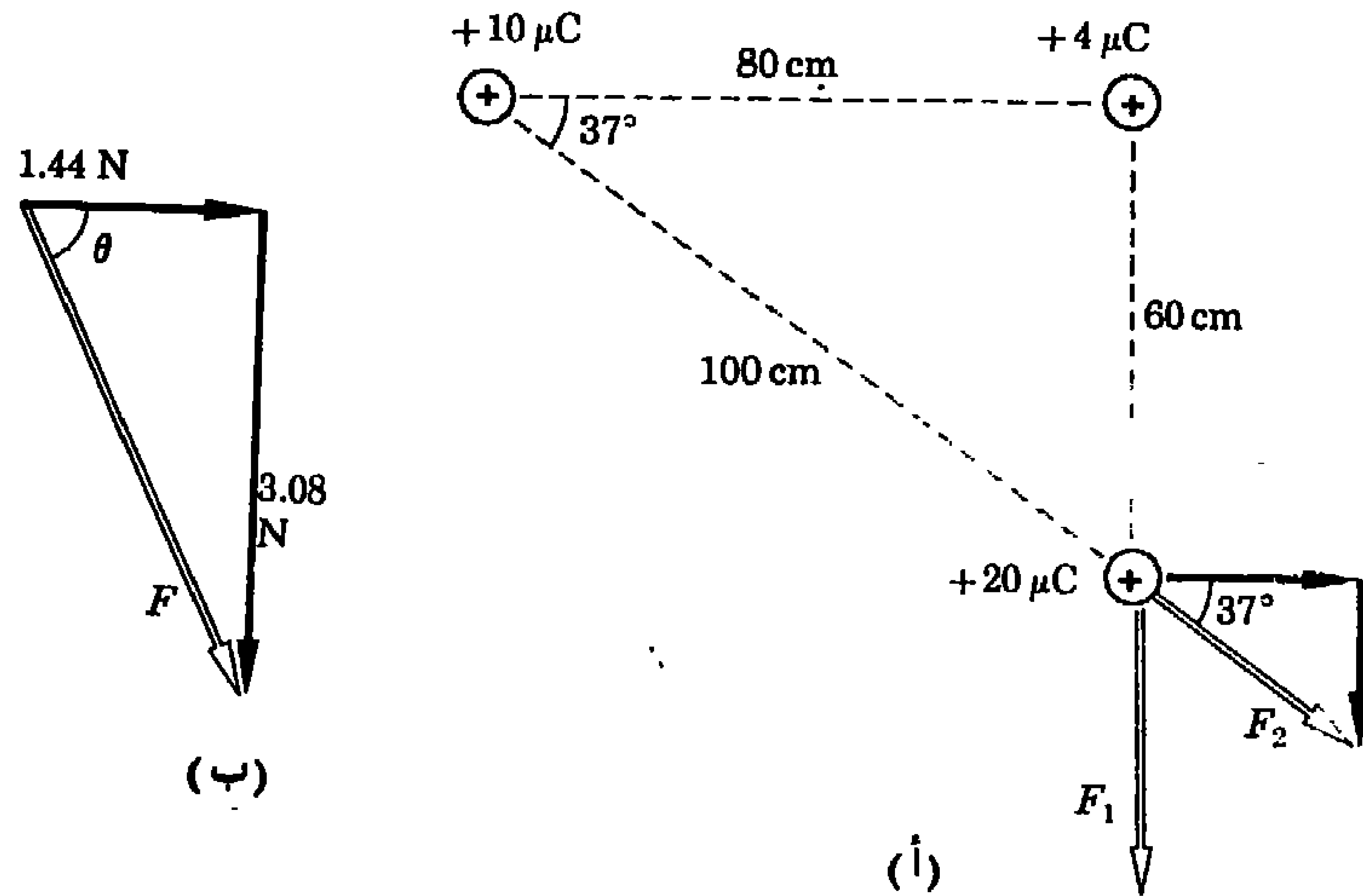
كما يوضح الشكل فان هاتين القوتين تؤثران فى اتجاهين متعامدين أى اننا نستطيع استعمال نظرية فيثاغورث لايجاد القوة المحصلة على الشحنة 10-μC .

$$\tan\theta = \frac{F_2}{F_1} = 3.00 \quad \text{و} \quad F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = 19\text{ N}$$

ومنها نجد أن

$$\theta = 71.5°$$

مثال توضيحى ١٦ - ٤ اوجد القوة المؤثرة على الشحنة +20-μC والمرسومة فى الشكل ١٦ - ١٣



شكل ١٦ - ١٣
القوى الموجهة التى تؤثر على الشحنة 20-μC تؤدى الى ظهور محصلة F موضحة فى الجزء ب

طريقة الحل : بتطبيق قانون كولوم ، نجد أن :

$$F_2 = 1.8\text{ N} \quad \text{و} \quad F_1 = 2.0\text{ N}$$

بتحليل F_2 الى مركباتها فإن $F_{2x} = F_2\cos 37 = 1.44\text{N}, F_{2y} = 1.08\text{N}$ كما هو موضح والقوة الكلية فى اتجاه y والمؤثرة على الشحنة $F_y = 2.0 + 1.08 = 3.08\text{ N}$ وهى إلى أسفل أما القوة الكلية فى اتجاه x فهى 1.44N وهى إلى اليمين . وكلتا القوتين ممثلتان فى الشكل ١٦ هـ ١٣ ب . من الواضح أن القوة المحصلة هى

$$\tan\theta = \frac{3.08}{1.44} = 2.14 \quad \text{و} \quad F = \sqrt{(1.44)^2 + (3.08)^2} = 3.4\text{ N}$$

ومنها

$$\theta \approx 65^\circ$$

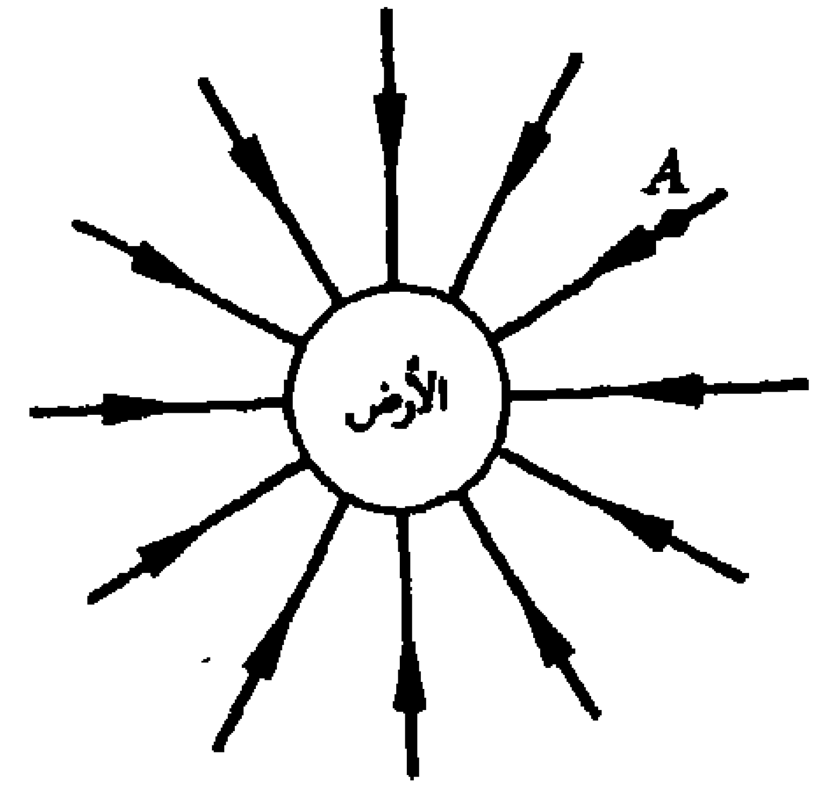
١٦ – ٨ المجال الكهربائى

سنجد من المناسب أن نناقش القوى الكهربائية بدلالة مفهوم يسمى **المجال الكهربائى** .

ويؤدى هذا المفهوم دورا فى الكهرباء مثلما يؤدى مفهوم مجال الجاذبية دوره فى الميكانيكا .

ومن الشائع على ألسنة الناس القول بأن حجرا اذا ترك فإنه يسقط إلى الأرض بسبب قوى الجاذبية الأرضية المتجهة الى أسفل . ويعنى الناس بهذا أن الحجر يجابه قوة الجاذبية وأن هذه القوة تجعله يتسارع.وحين نبتعد عن الأرض متجهين نحو الفضاء فإن جاذبية الأرض للأشياء تصبح صغيرة جدا . وهنا نقول أن مجال جاذبية الأرض يصبح ضعيفا جدا حين نبعد لمسافات كبيرة عن الأرض . ومجال التجاذب (الجاذبية) يقال إنه موجود فى منطقة من الفضاء حين تؤثر قوى جذب على جسم ما ، فإذا كان مجال الجاذبية كبيرا فإن قوة الجاذبية المؤثرة على كتلة ماتكون كبيرة .

شكل ١٦ – ١٤
مجال الجاذبية الأرضية يتجه شعاعيا الى الداخل ويزداد قوة كلما اقتربنا من الأرض .

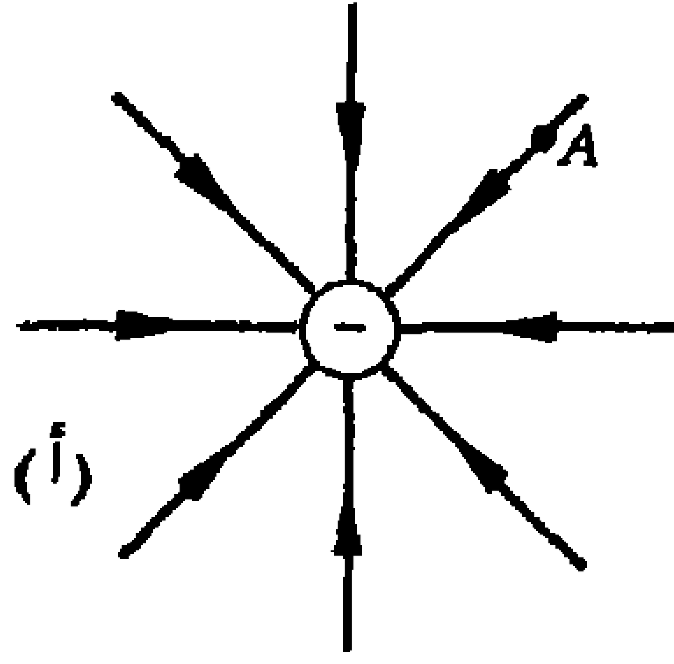


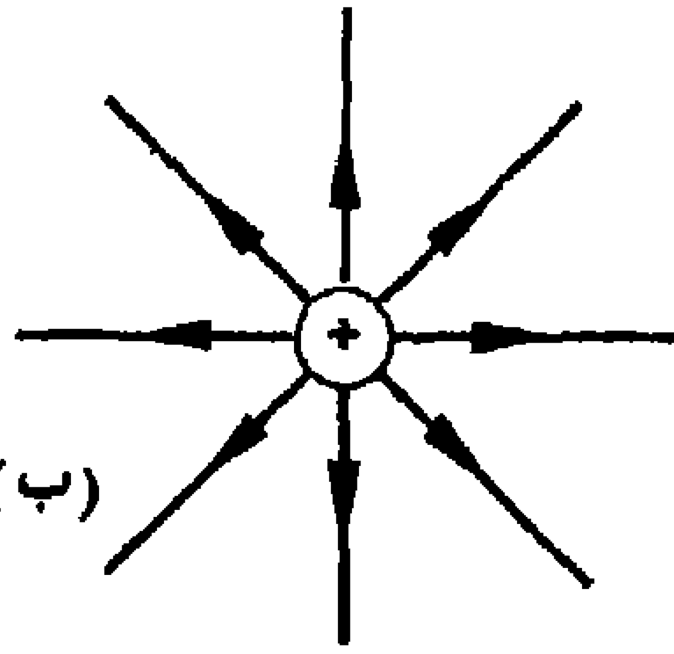
من المناسب رسم صورة لمجالات الجاذبية . يوضح الشكل ١٦ – ١٤ مجال الجاذبية الأرضية ويمكن تفسير هذه الصورة على النحو التالى : لو وضع جسم ماعند النقطة A فى الشكل فإنه سيعانى من قوة متجهة نحو مركز الأرض ، وتوضح خطوط القوة المرسومة فى شكل ١٦ – ١٤ ، اتجاه مجال الجاذبية الأرضية . أى اتجاه قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم .

حقيقة ، بالطبع ، يجب أن يرسم الشكل ١٦ – ١٤ فى ثلاثة أبعاد بحيث تتجه خطوط القوة من كل جانب نحو مركز الأرض . يلاحظ هنا أن خطوط القوة لاتمثل اتجاه القوة فحسب بل تشير أيضا الى مقدار هذه القوة . وحيثما كان المجال ، أى قوة الجاذبية ، كبيرا فإن خطوط القوة تكون متقاربة . أما بعيدا عن الأرض ، حيث تكون الخطوط متباعدة ، فإن مجال الجاذبية يكون ضعيفا . ويشار فى الكتب المدرسية المتقدمة ان هذه الصورة ليست فقط صحيحة من الناحية الكيفية ولكنها حقيقية تماما لكل من مجال الجاذبية والمجال الكهربائى .

يعرف المجال الكهربائى بطريقة مماثلة لمجال الجاذبية.لقد اصبح من المتفق عليه بشكل شامل تعريف اتجاه المجال الكهربائى بأنه اتجاه القوة الكهربائية التى تؤثر على **شحنة اختبار موجبة صغيرة** . وشحنه الاختبار هذه هى شحنه خيالية ذات مواصفات خاصة جدا : فهذه الشحنة لاتمارس أية قوة على الشحنات المجاورة وهى بهذا لاتسبب اضطرابا للشحنات المجاورة .

تعريف :





شكل ١٦ - ١٥
يتجه المجال الكهربى شعاعيا الى الداخل نحو شحنة سالبة صغيرة وشعاعيا الى الخارج من ناحية شحنة موجبة صغيرة .

ويمكننا من الناحية العملية – تقريب الشحنة الخيالية الى الأذهان باستخدام جسم صغير جدا يحتوى على شحنة صغيرة للغاية – وهذا الجسم سيسبب اضطرابا فى الشحنات القريبة منه ولكن بقدر ضئيل ومهمل .

افترض الآن أن شحنة اختبار موجبة قد وضعت عند النقطة A فى الشكل ١٦ – ١٥أ . ستنجذب هذه الشحنة الى الشحنة السالبة على طول الخط الشعاعى الموضح . ويعرف اتجاه المجال الكهربى عند A على أنه اتجاه القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة . وكما نرى ، فإن المجال الكهربى بالقرب من شحنة سالبة يتجه شعاعيا للداخل نحو هذه الشحنة . ويمثل المجال الكهربى بخطوط المجال المبينة .

يوضح الشكل ١٦ – ١٥ ب المجال الكهربائى حول شحنة موجبة وتلاحظ أن اتجاه الأسهم المرسومة على خطوط المجال الكهربائى تبدو مبتعدة عن الشحنة وذلك لأن الشحنة الموجبة تتنافر مع شحنة الاختبار الموجبة . وتسمى الخطوط التى رسمناها فى هذه الأشكال لتمثل القوة المؤثرة على شحنة الاختبار ، **خطوط القوة الكهربائية** ويمكننا التعميم على النحو التالى-تنبع خطوط القوة وتخرج من الشحنات الموجبة بينما تتجه نحو الشحنات السالبة وتنتهى عندها .

إننا نأمل أيضا أن نعرف شدة المجال الكهربائى بطريقة كمية . قلنا فيما سبق أن اتجاه المجال فى نقطة ماهو القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة موضوعة عند هذه النقطة محل السؤال . ومقدار أو شدة المجال الكهربائى تؤخذ على إنها القوة الكهربائيه **F** المؤثرة على شحنة اختبار دقيقة ، مقسومة على قيمة هذه الشحنة q . عند استعمال الرمز **E** للدلالة على شدة المجال الكهربائى فإن التعريف السابق يمكن كتابته على هيئة معادلة كما يلى :

$$E = \frac{F}{q} \qquad (١٦ - ٣)$$

من الواضح أن وحدات شدة المجال الكهربائى هى نيوتن لكل كولوم ، ولو أن q كانت 1C لأصبحت كل من F و E متساويتين عدديا . ولهذا السبب فإننا سننص دائما على أن : **شدة المجال الكهربائى** هى القوة المؤثرة على وحدة شحنة اختبار موجبة . على انه يجب أن ندرك دائما انه لقياس المجال تستعمل شحنة أصغر بكثير من 1C حتى لاتسبب اضطرابا للشحنات الأخرى الموجودة .

مثال توضيحى ١٦ – ٥ : اوجد شدة المجال الكهربائى على بعد **50cm** من شحنة موجبة قدرها $10^{-4}C$

طريقة الحل : نريد أن نوجد المجال عند النقطة A فى الشكل ١٦ – ١٦ ، وحيث أن المجال هو القوة على وحدة الشحنات الموجبة ، لذا فاتجاهه يكون الى اليمين كما يشير السهم . ولحساب مقدار المجال الكهربائى فإننا نستعين بقانون كولوم (وذلك بتخيل أننا وضعنا شحنة اختبار q_t عند A) . لدينا الآن :

$$F = (9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}) \left(\frac{q_1 q_2}{r^2}\right)$$

وفى حالتنا هذه $q_1 = 10^{-4}$ C ، $q_2 = q_t$ ، $r = 0.5$m وحيث أن $F/q_t = E$ فإننا نجد على الفور

$$E = (9 \times 10^9)\left[\frac{10^{-4}}{(0.50)^2}\right] = 3.6 \times 10^6\ \mathrm{N/C}$$

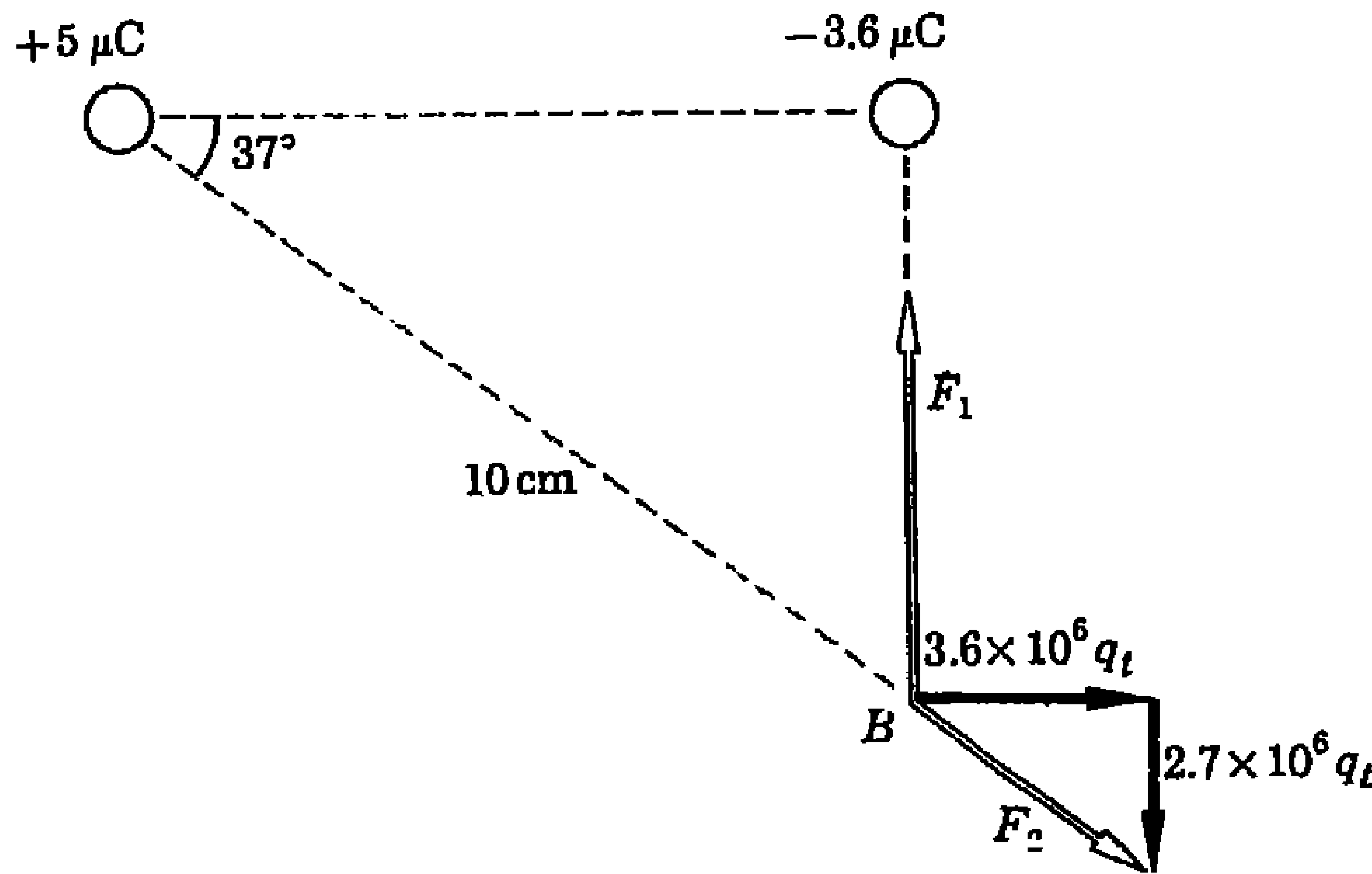
عليك إثبات أن الإجابة ذات وحدات صحيحة .

شكل ١٦ – ١٦
$q = 10^{-4}$ C — 50 cm — A — E

لكى نوجد المجال الكهربائى E عند النقطة A ، فإن علينا أن نحسب القوة التى تؤثر على وحدة الشحنات الموجبة إذا وضعت عند تلك النقطة .

مثال توضيحى ١٦ – ٦ . اوجد شدة المجال الكهربائى عند النقطة B فى الشكل ١٦ – ١٧ .

طريقة الحل : تخيل اننا وضعنا شحنة اختبار موجبة q_t عند B ثم نقوم بحساب القوة المؤثرة عليها باستخدام قانون كولوم . وباستعمال المتجهات الموضحة



شكل ١٦ – ١٧
لايجاد المجال عند B فإننا يجب أن نجد القوى F_1 ، F_2 التى تؤثر على شحنة الاختبار الموجبة q_t والموضوعة عند تلك النقطة .

$$F_1 = (9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}) \left(\frac{3.6 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}}{0.0036\ \mathrm{m^2}}\right) q_t = 9 \times 10^6 q_t \text{ newtons}$$

وهكذا فان ،

$$E_1 = (9 \times 10^6)\ \mathrm{N/C}$$

وبالمثل

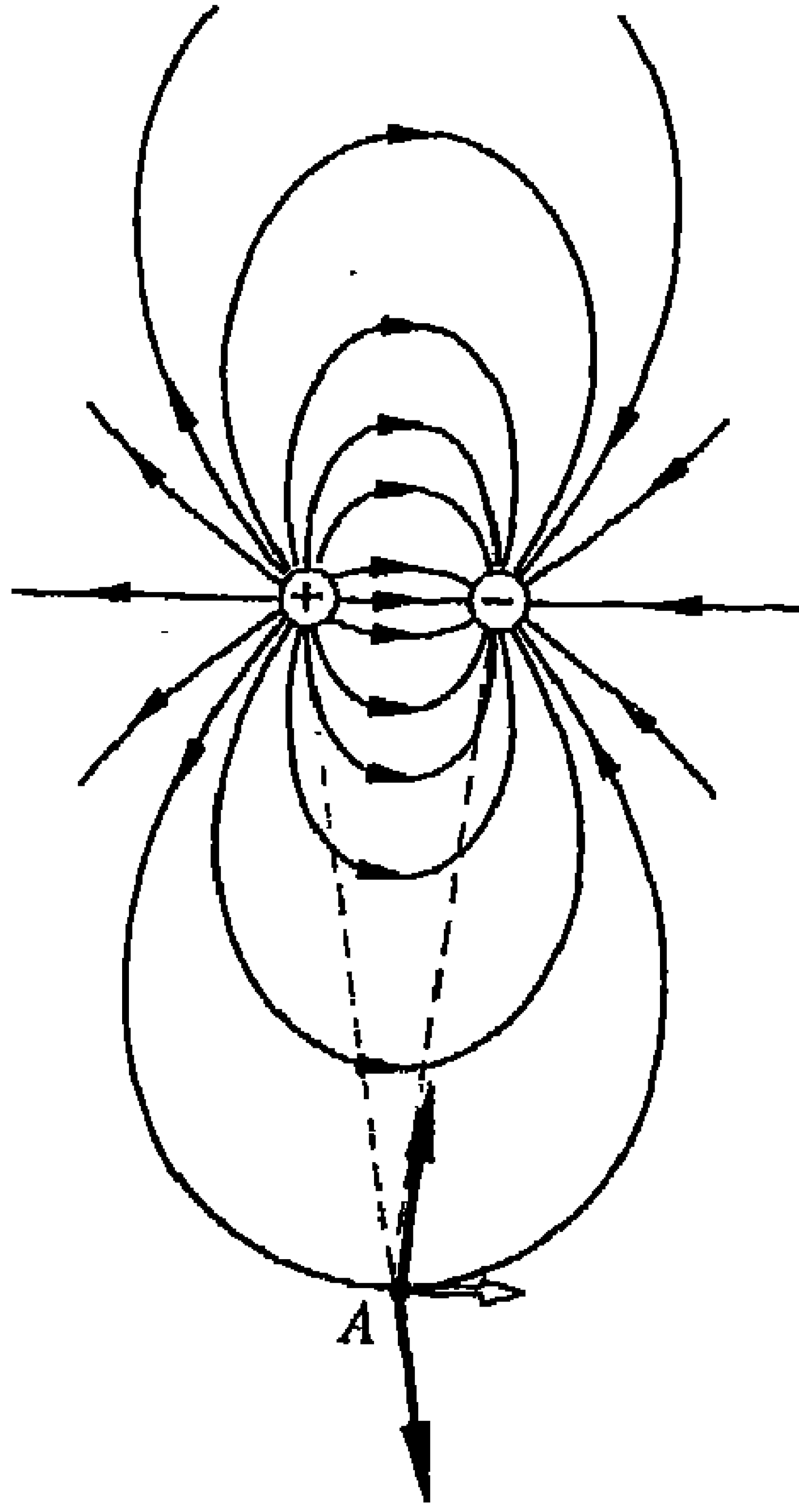
$$E_2 = 4.5 \times 10^6\ \mathrm{N/C}$$

ومن هذا باستخدام المركبات :

$$E_x = 3.6 \times 10^6\ \mathrm{N/C} \qquad E_y = 9 \times 10^6 - 2.7 \times 10^6 = 6.3 \times 10^6\ \mathrm{N/C}$$

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 \qquad E = 7.3 \times 10^6\ \mathrm{N/C}$$

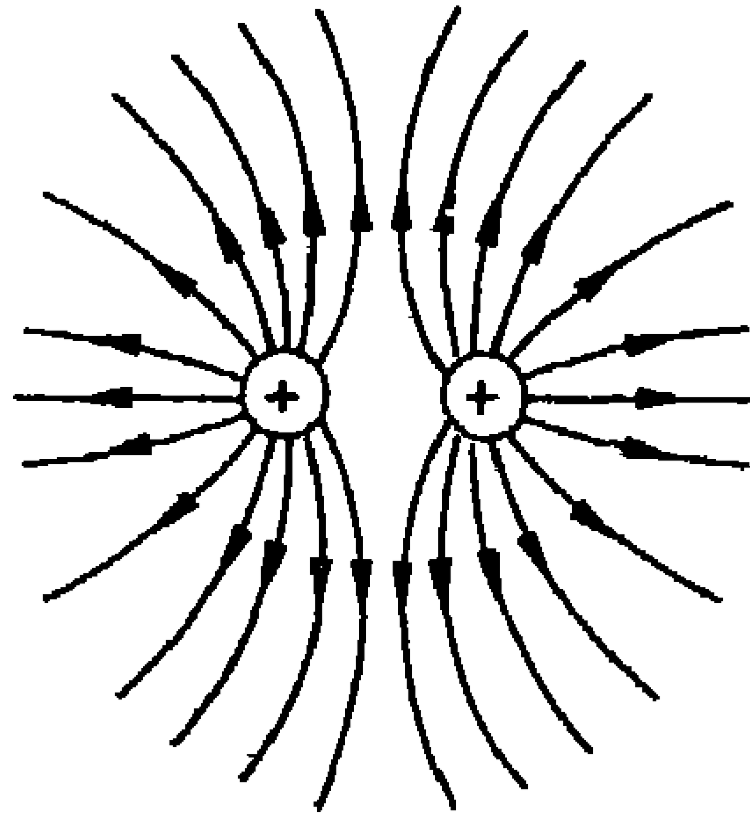
١٦ – ٩ المجال الكهربائى فى أنظمة مختلفة



شكل ١٦ – ١٨
تتبع خطوط المجال الكهربائى من على الشحنة الموجبه وتنتهى على الشحنة السالبة

ان قدرا كبيرا من التعمق فى موضوع ما يمكن الوصول اليه بدراسة تخطيط المجال الكهربائى الخاص به ، ولتبيان هذا دعنا نفحص عدة مجالات كهربائية وتوزيع الشحنات التى سببت هذه المجالات ، متذكرين دائما أن المجال الكهربائى قد عرف على أنه القوة المؤثرة على وحدة الشحنات الموجبة ، وأن خطوط القوة يجب أن ترسم دائما نابعة من الشحنات الموجبة متجهة الى الشحنات السالبة .

اعتبر المجال الكهربائى حول شحنتين متساويتين احداهما موجبة والأخرى سالبة كما هو موضح بالشكل ١٦ – ١٨ . سيكون المجال الكهربائى متشابها حول كل منهما فيما عدا أنه سيتجه الى الشحنة السالبة ، وخارجا من الشحنة الموجبة وهذا المجال مبين فى الشكل ١٦ – ١٨ . وعليك أن تفحص نقطا متعددة فى الشكل حتى تقتنع أن شحنة الاختبار الموجبة تتأثر فعلا بقوة فى الاتجاه المبين بخطوط القوة فى الشكل . ولمعرفة كيف يتم هذا ، اعتبر نقطة A فى الشكل ١٦ – ١٨ . إذا وضعت شحنة اختبار موجبة عند نقطة A فإنها ستتنافر مع الشحنة الموجبة وتنجذب الى الشحنة السالبة . وقوة التجاذب ستكون مساوية لقوة التنافر لأن شحنة الاختبار تبعد بنفس القدر عن كل من الشحنتين . وتكون محصلة هاتين القوتين عبر خط القوه عند نقطة A .



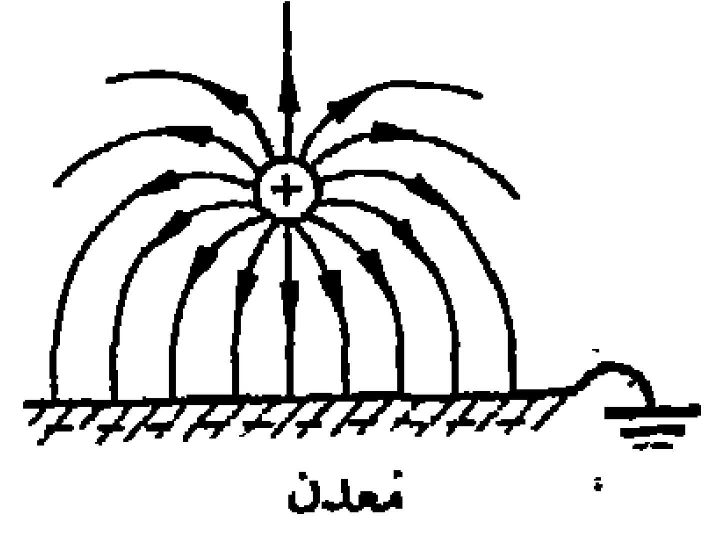
شكل ١٦ – ١٩
لاحظ كيف تظهر خطوط القوة حول شحنتين متشابهتين وكأنها تتدافع وتتنافر مع بعضها البعض . لماذا يجب أن يحدث الأمر هكذا ؟

هناك موقف مشابه وهو المجال بالقرب من شحنتين متشابهتين وهو مبين بالشكل ١٦ – ١٩ . يوضح هذا الشكل كما كان أيضا فى الشكل ١٦ – ١٨ أن المجال يكون أكبر مايمكن حين تكون خطوط القوة متقاربة جدامع بعضها البعض ، وهذه طريقة مناسبة لتقدير شدة المجال الكهربائى .

افترض الآن أن كرة مشحونة بشحنة موجبة منتظمة علقت فوق لوح معدنى كبير . فلو أن اللوح المعدنى كان متصلا بالأرض لجرت الشحنات منه (أو اليه) الى المعين الذى لاينضب للأرض ، ويوضح الشكل ١٦ – ٢٠ هذا الموقف . نلاحظ لأول وهلة أن الالكترونات فى المعدن ستنجذب بالشحنات الموجبة ، وعلى الرغم من انها لاتستطيع مغادرة اللوح ، الا انها ستتجمع على سطح اللوح تحت الشحنة الموجبة مباشرة ، وستقوم شحنات سالبة بالسريان من الأرض الى اللوح لكى تحل محل الالكترونات التى احتلت مواقعها بالقرب من مركز اللوح .

إن شحنة الإختبار الموجبة والمستخدمة لتحديد اتجاه المجال ستجذب وتدفع الى أسفل فى اتجاه اللوح فى المنطقة المركزية ويمكنك بسهولة التحقق من أن خطوط القوة

المرسومة فى الشكل ١٦ – ٢٠ تمثل فى الواقع القوة المؤثرة على شحنة الإختبار الموجبة . وبالمثل فإن كثافة الخطوط تشير الى شدة المجال وكما هو متوقع يكون المجال أشد ما يمكن بالقرب من الشحنة الموجبة .



شكل ١٦ – ٢٠
تقوم الشحنة الموجبة بجذب الشحنات السالبة نحو قمة اللوح المعدنى . لماذا كانت خطوط المجال عمودية على اللوح عند سطحه ؟

هناك سمتان دقيقتان وهامتان للشكل (١٦ – ٢٠) ويجب الاشارة اليهما . أولهما أن خطوط القوة لا تنفذ داخل اللوح المعدنى وانما تتوقف جميعها عند السطح مما يشير الى أن المجال الكهربى داخل المعدن صفر ، أى أنه لا توجد قوة تؤثر على الشحنة داخل المعدن . ويمكن فهم هذا الموقف فى ضوء التحليل التالى : سنعتبر ظروفا الكتروستاتية أى أنه لا يوجد فيض مستمر للشحنة ، فلو أن هناك مجالا داخل المعدن إذن لأثر بقوة على الالكترونات الحرة داخل المعدن ولتحركت هذه الالكترونات مسببة تيارا كهربائيا ولكننا لا نلاحظ أية تيارات تحت الظروف الالكتروستاتية ، ولذا فالمجال الكهربى يجب أن يكون صفرا داخل معدن ما .

تتعلق النقطة الثانية بحقيقة أن خطوط القوة متعامدة مع سطح المعدن . سنشير أولا الى أن خطوط القوة تمثل القوة المؤثرة على شحنة موجبة ، أى أن الشحنات السالبة ستدفع فى الإتجاه المعاكس . فى الشكل ١٦ – ٢٠ تتأثر الإلكترونات السالبة الشحنة وهى عند سطح المعدن بقوة تحاول أن تجذبها الى أعلى نتيجة للتجاذب مع الشحنة الموجبة المعلقة فوق المعدن . ولكن الإلكترونات حبيسة داخل جسم المعدن ولاتستطيع التحرر تحت تأثير هذه القوة .

افترض الآن أن القوة لم تكن عمودية بالضبط على سطح المعدن أى أن لها مركبة موازية لسطح المعدن . ولما كانت الإلكترونات قادرة على الحركة فى ذلك الاتجاه ، فانها تستطيع أن تتأثر بمركبة القوة وتتحرك مسببة تيارا كهربيا ولكن الظروف كما قلنا هى ظروف الكتروستاتية لذا فلا تيار يمر وعليه فإنه لا توجد مركبة للمجال الكهربائى فى محاذاة سطح المعدن . ونستنتج أن المجال متجه عموديا على سطح المعدن .

سنعود مرة أخرى الى استعمال هذه الحقائق لأنها تعتبر حقائق عامة فى أية مشكلة من مشاكل الكهربية الساكنة ، لذا سنذكرهم بالنص مرة أخرى . تحت ظروف الكتروستاتية .

فإن :

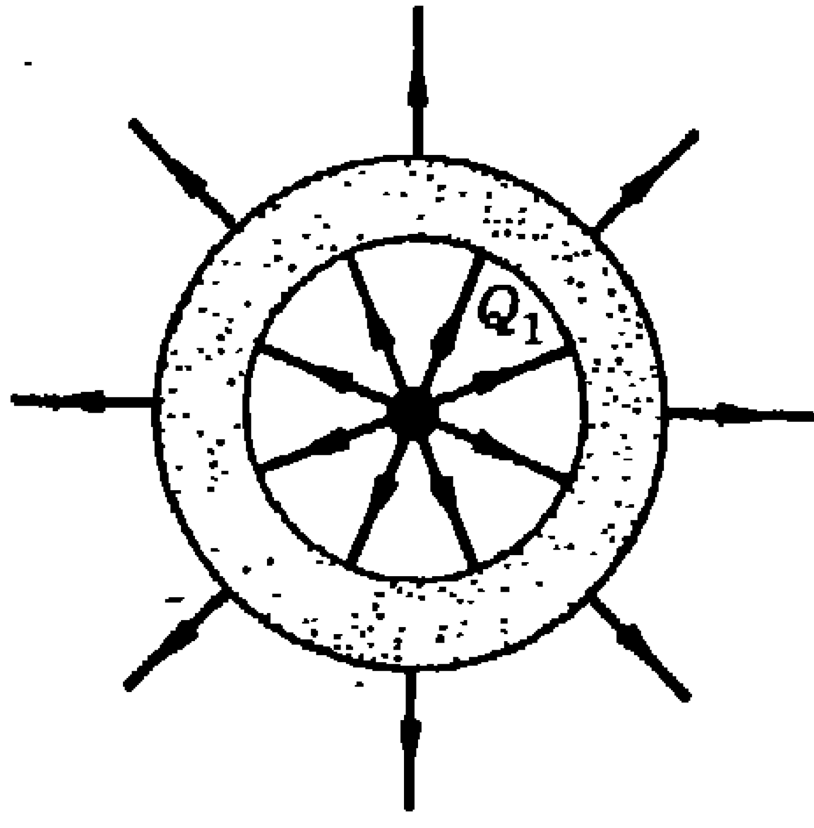
١ – يكون المجال الكهربائى داخل معدن ما صفرا

٢ – يكون المجال الكهربائى خارج سطح المعدن مباشرة عموديا على السطح

حيث أن هذه الحقائق قد تم برهانها بالرجوع الى حركة الإلكترونات الحرة داخل معدن لذا فالبراهين المستخدمة لن تصلح للعوازل التى لا تحوى إلكترونات حرة . وعليه فالقواعد السابقة تنطبق فقط فى حالة المعادن وليس للعوازل .

مثال توضيحى ١٦ – ٧ : وضح بالرسم مستخدما خطوط القوة أن شحنة معلقة داخل تجويف معدنى تحدث شحنة مساوية ومعاكسة فى الإشارة على السطح الداخلى .

طريقة الحل : لنفرض ان الجسم المعدنى ممثل كما هو فى الشكل ١٦ – ٢١ . تخرج خطوط القوة من الشحنة الموجبة Q_1 والتى علقت فى التجويف . ولما كان المجال الكهربائى داخل المعدن يجب أن يكون صفرا تحت الظروف الالكتروستاتية كالتى لدينا لذا وجب أن تقف خطوط القوة الصادرة عن Q_1 عند اصطدامها بسطح المعدن . وتكون هيئتها كما فى الشكل . ولكن هذا يعنى أن السطح الداخلى سيكتسب شحنة سالبة لأن خطوط القوة تتجه دائما الى الشحنات السالبة وتنتهى عندها . وبالإضافة الى هذا ، لما كان عدد خطوط القوة الصادرة عند Q_1 مساويا لعددها الذى ينتهى عند الشحنة السالبة لذا يمكن القول بأن شحنة السطح الداخلى هى $-Q_1$



شكل ١٦ – ٢١
تتكون شحنة $-Q_1$ على السطح الداخلى للمعدن: هل يمكن أن يكون هذا صحيحا حتى فى غياب هذه الدرجة العالية من التماثل والتى استخدمت هنا ؟

لو أن الجسم المعدنى كان متعادلا قبل وضع Q_1 فى التجويف ، ولو أنه لم يسمح لأية شحنة أن تزيد أو تنقص من الجسم المعدنى ، لظل الجسم بدون شحنة صافية . لهذا فان شحنة $+Q_1$ يجب أن تظهر على الأجزاء الخارجية للجسم . هل يمكنك – باستخدام خطوط القوة – أن تثبت أن الشحنة الموجودة على السطح الخارجى تكون بالصورة الموضحة ؟ هل يمكنك إثبات أن النتائج التى وصلنا اليها هنا لا تعتمد على شكل الجسم أو التجويف ؟

١٦ – ١٠ طاقة الوضع الكهربائية :

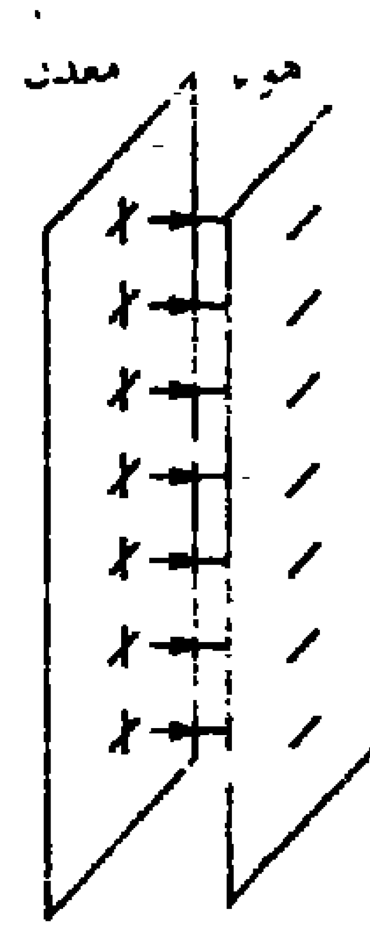
فرق الجهد

عند مناقشة حركة جسم من مكان الى آخر داخل مجال للجاذبية فإننا استعملنا مفهوم طاقة وضع الجاذبية PE . لو تتذكر أننا قد عرفنا الفرق فى PE بين نقطتين على أنه الشغل المبذول فى تحريك جسم من نقطة الى النقطة الأخرى . والأكثر من هذا أن المسار الذى يتحرك عبره الجسم من نقطة الى أخرى لم تكن له أية متطلبات : فالشغل المبذول وتبعا لذلك الفرق فى طاقة الوضع هى نفسها لجميع المسارات . وقد سمى مجال الجاذبية بأنه مجال احتفاظى لأن له هذه الخاصية .

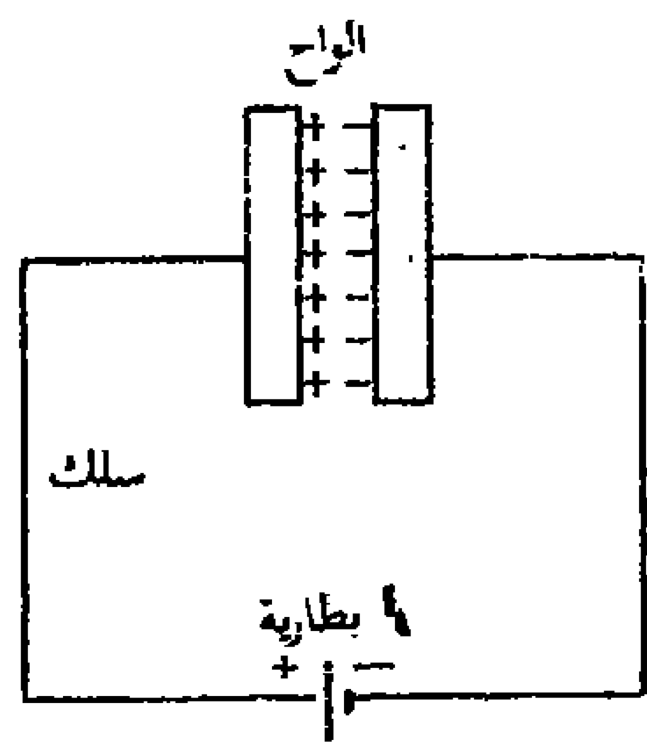
ويتكرر نفس الموقف فى الكهرباء . اعتبر مجالا كهربائيا بين لوحين مشحونين . (يمكن شحن اللوحين عن طريق توصيلها بطرفى البطارية كما سنرى فيما بعد . يقوم الطرف الموجب للبطارية بوضع الشحنات الموجبة على اللوح المتصل به وتكتسب شحنة سالبة على اللوح المتصل بالطرف السالب للبطارية) ويبين الشكل ١٦ – ٢٢ هذين اللوحين . سنعتبر أن أبعاد اللوحين هائلة جدا بالمقارنة مع المسافة بينهما بحيث يصبح تأثير حواف الالواح مهملا فى المنطقة المركزية للمجموعة . يوضح الجزء أ من

الشكل ١٦ – ٢٢ منظرا عن قرب لجزء من اللوحين بينما يوضح الجزء ب الدائرة الكاملة .

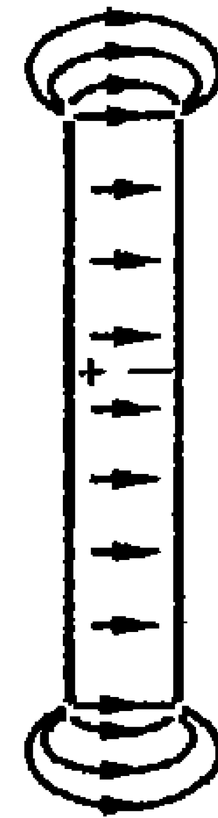
إذا ما تجاهلنا تأثيرات حواف الألواح فإنه بوضع شحنة اختبار موجبة بين الألواح ستلقى هذه الشحنة قوة مبتعدة عن اللوح الموجب ومتجهة نحو اللوح السالب ويكون المجال الكهربائى E منتظما وفى الاتجاه المبين فى شكل ١٦ – ٢٢ أ ، جـ . أما عند الحواف فان شكل المجال يكون تقريبا كما هو موضح فى شكل ١٦ – ٢٢ ح وتسمى الأداة متوازية اللوحين من هذا النوع العام **مكثفا** .



(أ)



(ب)



(ج)

شكل ١٦ – ٢٢
حين توصل بطارية بلوحين معدنيين كما فى (ب) فإن مجالا كهربائيا ينشأ بين اللوحين كما هو موضح فى (أ) ، (جـ) .

إفترض الآن أن وحدة شحنة اختبار موجبة ، أى شحنة اختبار خيالية ، قد وضعت بين لوحى المكثف حيث تتعرض لقوة مقدارها E نحو اليمين (القوة هى E باعتبار أن المجال الكهربائى هو القوة المؤثرة على وحدة الشحنات الموجبة). هناك شغل سيبذل لتحريك شحنة الاختبار من مكان الى مكان داخل المجال ، ويمكننا حساب الشغل المبذول فى تحريك وحدة شحنة اختبار موجبة من النقطة A الى عدة مواقع أخرى بين اللوحين وذلك بالرجوع الى الشكل ١٦ – ٢٣ .

تعريف

لكى تقوم قوة بتحريك وحدة شحنة موجبة من A الى B فى الشكل ١٦ – ٢٣ فإنه تلزم قوة E لجذبها وذلك لمعادلة المجال الكهربائى ، وعليه فالشغل المبذول فى حمل وحدة شحنة الإختبار الموجبة من A الى B هو (القوة) × (المسافة) أو سنعرف هذا الشغل على أنه فرق الجهد بين النقطتين A و B. وبشكل عام يكون فرق الجهد من النقطة A الى النقطة B هو الشغل المبذول فى حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من A الى B ، باستخدام الرمز V_A للجهد عند النقطة A فإنه يصبح لدينا فى الحالة الخاصة لمنطقة يكون فيها **E** ثابتا :

فرق الجهد فى مجال منتظم $\qquad V_B - V_A = Ed \qquad$ مجال ثابت (١٦ – ٤)

وواحدات V هى نيوتن – متر لكل كولوم . ولكن الشغل هو حاصل ضرب القوة والمسافة لذا فإن نيوتن × متر هى اجول . أى أن V لها وحدات جول لكل كولوم وهذه الوحده تسمى **فولت Volt** (وتختصر بالحرف V . ويقاس فرق الجهد بالفولت

لقد أصبح من المعتاد أن نقول أن نقطة مثل B تقع عند جهد أعلى من النقطة A أى أن وحدة شحنة الإختبار الموجبة يجب أن تسحب من A الى B ، وعليه بالتشابه مع حالة الجاذبية تقع B أعلى التل بالنسبة الى A أو عند جهد أعلى من جهد A . نلاحظ أيضا أنه لو اطلقت شحنة موجبة عند B لتسارعت نحو A فالمجال الكهربائى E يؤثر بقوة على الشحنه رتقع الشحنة تحت تأثير هذه القوة . وهناك تشابه وثيق بين

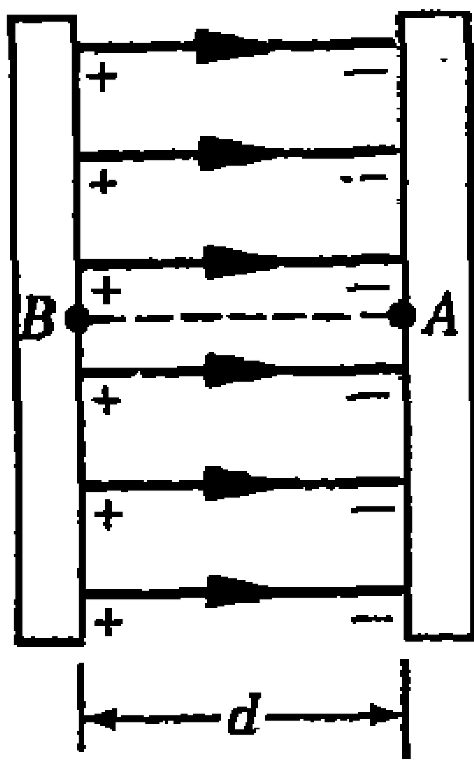
جسم يسقط من مكان ذى جهد مرتفع الى جهد أقل تحت تأثير مجال الجاذبية وانحدار الشحنة تحت تأثير المجال الكهربائى .

ولنؤكد مرة أخرى أن فرق الجهد بين نقطتين A و B ، $V_B - V_A$ هو عبارة عن الشغل المبذول فى حمل وحدة الشحنات الموجبة من النقطة A الى النقطة B . ويعبر عن هذا الشغل بوحدات جول لكل كولوم أو بشكل عام بالفولت . إذا لم تكن الشحنة المحمولة من A الى B هى وحدة الشحنات الموجبة وانما شحنة أخرى q فإن الشغل المطلوب سيكون :

العلاقة بين الشغل وفرق الجهد

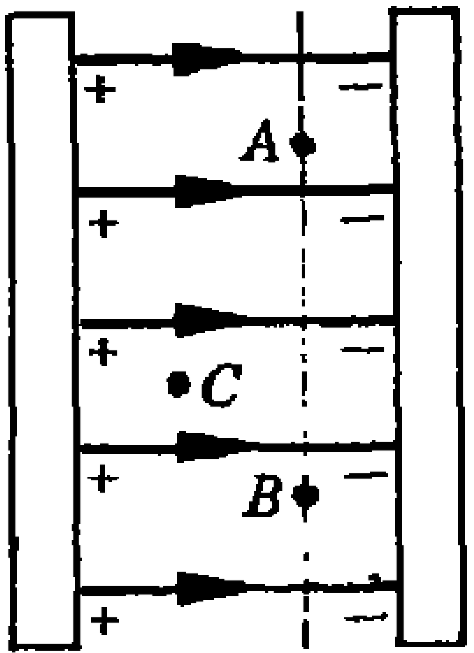
$$\text{الشغل} = (V_B - V_A)q \qquad ١٦ - ٥$$

ويختزن هذا الشغل فى النظام على هيئة طاقة وضع كهربائية .



شكل ١٦ - ٢٣
حيث أن الشغل المطلوب بذله لحمل وحده الشحنات الموجبة من A الى B هو Ed لذا فإن فرق الجهد بين اللوحين هو Ed .

بالرجوع الى شكل ١٦ - ٢٤ على نفس الصفحة ، ما هو مقدار الشغل الذى علينا بذله لتحريك شحنة اختبار موجبة من A الى B ؟ لكى نمسك بالشحنة فى مكانها فإننا يجب ان نؤثر عليها بقوة الى اليسار . وهذه القوة ضرورية للإتزان مع تأثير قوة المجال الكهربائى على شحنة الإختبار . ولكن اذ حركنا الشحنة من A الى B ، فإن قوة الإتزان لن تبذل شغلا لأن اتجاه الحركة عمودى على اتجاه القوة . أى اننا بالفعل لا نحتاج لبذل أى شغل لتحريك الشحنة فى اتجاه عمودى على المجال الكهربائى . وعلى ذلك لا يوجد فرق للجهد بين النقطتين A و B فى الشكل ١٦ - ٢٤ . وفى الحقيقة فإنه يجب أن يكون واضحا أن جميع النقط الواقعة على الخط المنقطع المار خلال A و B تكون عند نفس الجهد . ويسمى هذا الخط ذو الجهد الثابت بخط متساوى الجهد . بل أن المستوى الذى يقع فيه هذا الخط ويكون موازيا للوح يكون مستوى ذا جهد ثابت ويسمى **مستوى متساوى الجهد** . ولايبذل شغل عند تحريك شحنة على طول خط متساوى الجهد أو مستوى متساوى الجهد لأن مثل هذه الحركة تكون دائما متعامدة مع خطوط القوة أى مع المجال الكهربائى. وبالعكس فان خطوط القوة تكون دائما متعامدة مع خطوط متساوية الجهد .



شكل ١٦ - ٢٤
تقع النقطتان A و B على خط تساوى الجهد .

هناك عدد لانهائى من خطوط ومستويات الجهد بين اللوحين فى الشكل ١٦ - ٢٤ وليس من الصعب إثبات أنه لا يبذل شغل صافى حين تحرك شحنة على طول مسار يبدأ وينتهى عند نفس خط أو مستوى متساوى الجهد . هل يمكنك إثبات ذلك ؟ ويمكن استخدام نفس التحليل لإثبات أن الشغل المبذول فى حمل شحنة من A الى نقطة مثل C فى شكل ١٦ - ٢٤ لا يعتمد على المسار الذى تم خلاله الشغل . وعلى ذلك نستنتج أن المجال الكهربائى الساكن هو مجال احتفاظى وان فرق الجهد الكهربائى بين نقطتين يكون ثابتا وغير معتمد على المسار الذى اعتبر عند حساب فرق الجهد .

المجال الاحتفاظى

مثال توضيحى ١٦ - ٨ : استخدمت بطارية 20V لشحن لوحى المكثف الموضح فى شكل ١٦ - ٢٤ . ما هو مقدار المجال الكهربائى بين اللوحين ؟ المسافة بين اللوحين هى 0.1cm (تقوم البطارية بجعل فرق الجهد بين اللوحين يصل الى 20V) .

طريقة الحل : حسب التعريف السابق فإن فرق الجهد بين اللوحين وهو 20V يعنى أن 20J من الشغل تلزم لنقل 1C من شحنة الاختبار من أحد اللوحين الى الآخر . وحيث أن القوة المؤثرة على وحدة شحنة اختبار هى شدة المجال E ، ولما كانت E ثابتة فان لدينا :

$$\frac{\text{الشغل}}{\text{الشحنة}} = \left(\frac{\text{القوة}}{\text{الشحنة}}\right) \times (d)$$

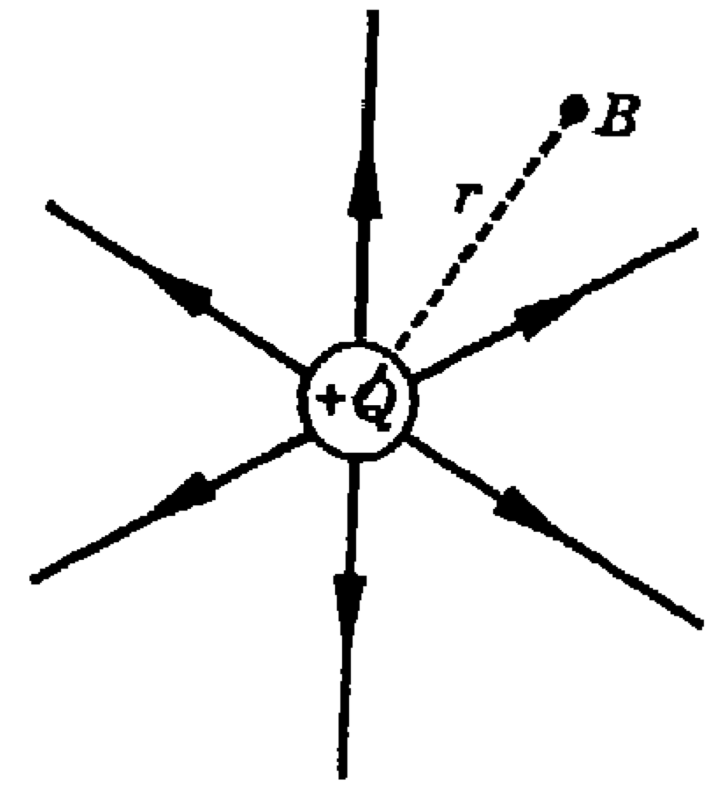
$$20\ \text{V} = (E)(0.10 \times 10^{-2}\ \text{m})$$

$$E = 20{,}000\ \text{V/m}$$

الوحدات فولت لكل متر (V/m) تكافىء الوحدات المستخدمة سابقا وهى نيوتن لكل كولوم newtons/coulomb هل تستطيع توضيح هذا ؟

١٦ - ١١ الجهود المطلقة

لقد اهتممنا حتى الآن بالفرق فى الجهد فقط وسبب هذا ، كما هو الحال فى جهود الجاذبية ، أن اختيار موضع الصفر لطاقة الوضع PE هو مسألة ملائمة لا أكثر. فطاقة وضع الجاذبية يمكن قياسها بالنسبة الى أية نقطة نختارها : سطح منضدة مثلا ، الأرض ، قمة بناء ما ، أو أى مكان آخر . وبالمثل فإنه فى مسائل طاقة الوضع الكهربائية PE يكون موقع الصفر لطاقة الوضع مسألة اختيار بحت . وفى نظرية الدوائر الكهربائية يمكن توصيل أحد الأسلاك بالأرض وذلك بلحامه مع أنبوبة المياه .. وتصبح هذه النقطة هى التى فيها طاقة الوضع صفرية . وفى حالات أخرى يمكن اختيار مواقع أخرى يكون فيها الجهد الكهربائى صفرا .



شلك ١٦ - ٢٥
يعرف الجهد المطلق عند B على أنه الشغل المبذول فى حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من مالانهاية حتى B

حين نتناول الذرات والجزيئات فنحن دائما نحدد صفر طاقة الوضع الكهربائية بطريقة مختلفة . ولتوضيح هذه الطريقة فى تناول الموضوع سنرجع الى شكل ١٦ - ٢٥ حيث نرى كرة مشحونة بشحنة قدرها $+Q$. قد تكون هذه الكرة بمثابة بروتون مثلا (البروتون هو نواة ذرة الأيدروجين ويحمل شحنة قدرها $e = +1.6 \times 10^{-19}\text{C}$) ومن المعتاد فى مثل هذه الحالات أن يعتبر صفر طاقة الوضع الكهربائية على مسافة لانهائية بعيدا عن الشحنة ، ولنر الآن نتائج هذا الاختبار .

تعريف الجهد المطلق

اعتبر النقطة B فى شكل ١٦ — ٢٥ التى تقع على بعد نصف قطر قدره r من مركز الشحنة يعرف **الجهد المطلق** عند B على أنه الشغل المبذول فى حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من مالا نهاية الى النقطة B .

وعمليا فنحن نفعل الاتى : لقد ناقشنا الأمور حتى الآن بدلالة فرق الجهد ، $V_B - V_A$، على أننا الآن نعتبر النقطة A موضوعة فى المالانهاية ، ثم نعتبر أن الجهد فى الملانهاية . صفرا بحيث أن $V_A = 0$ وتصبح V_B هى الجهد المطلق عند B . نلاحظ هنا بعناية انه عندما نتحدث عن الجهد المطلق عند نقطة ما فنحن فى الحقيقة نتحدث عن فرق الجهد بين المالانهاية وتلك النقطة .

من السهولة بمكان الحصول على تعبير يعطى الجهد المطلق خارج شحنة معزولة منفردة كالتى ترى فى الشكل ١٦ — ٢٥ . نحتاج هنا الى حساب الشغل اللازم بذله لحمل وحدة شحنة الاختبار من مالانهاية حتى النقطة B على سبيل المثال . وليست الحسابات هنا بنفس السهولة التى أوجدنا بها فرق الجهد للوحين المتوازيين حيث كان المجال ثابتا وبالتالى كانت القوة ثابتة وكان فرق الجهد ببساطة هو Ed

أما فى الحالة الراهنة فتزداد شدة E كلما اقتربنا من B وعند المالا نهاية تكون E صفرا . ومن الواضح أن قيمة E تتغير وكذلك القوة المؤثرة على شحنة الاختبار عندما نحضرها من مالا نهاية ، وعلى الرغم من هذه الحقيقة الا أن الشغل المبذول فى احضار شحنة الإختبار من مالا نهاية الى النقطة B لازال يحسب بسهولة باستخدام حساب التفاضل والتكامل . سنقوم هنا بذكر النتيجة فقط . الجهد المطلق V ، عند النقطة B فى الشكل ١٦ — ٢٥ نتيجة لوجود الشحنة $+Q$ أى الشغل المطلوب لحمل وحدة الشحنات الموجبة من مالا نهاية حتى النقطة B هو

$$V = k\frac{Q}{r}$$

أو

جهد الشحنة النقطية

$$V = (9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\left(\frac{Q}{r}\right) \qquad (١٦ - ٦)$$

وتنطبق هذه المعادلة ، مثل قانون كولوم ، فى حالة شحنات نقطيه أوكرات منتظمة الشحنة فقط . أما فى الحالات الأخرى فان المسافة r لاتكون عادة محددة بدقة .

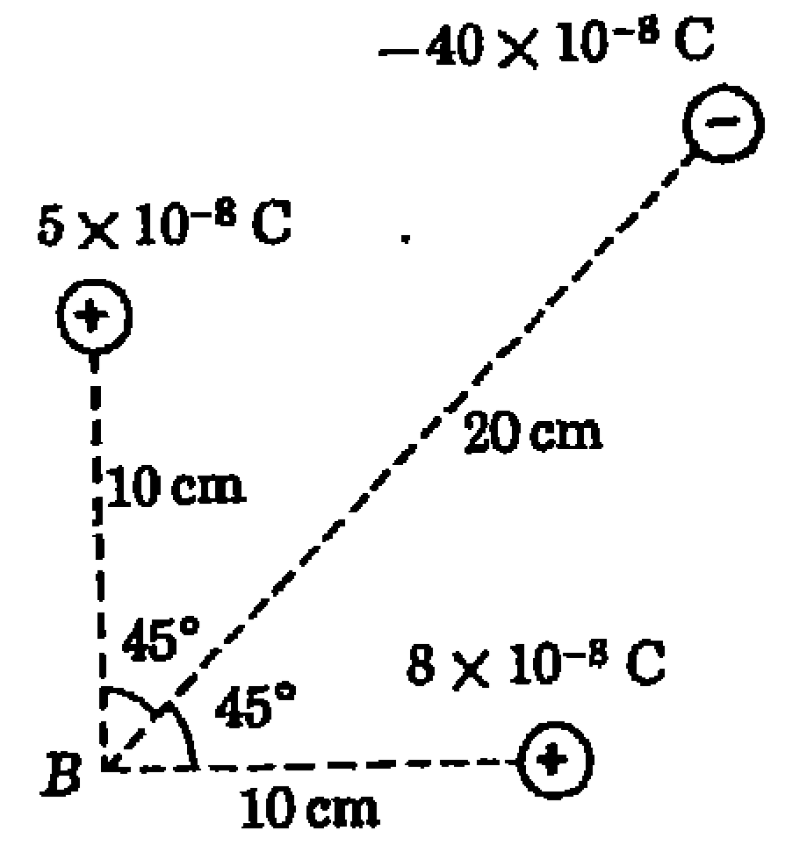
مثال توضيحى ١٦ — ٩ احسب الجهد المطلق عند النقطة B فى شكل ١٦ — ٢٥ اذا كانت $r = 50\ \mathrm{cm}$ ، $Q = 5 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}$

طريقة الحل : من المعادلة (١٦ — ٦) فإن لدينا مباشرة

$$V = (9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\left(\frac{5 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}}{0.50\ \mathrm{m}}\right) = 90{,}000\ \mathrm{V}$$

تحقق من الوحدات المعطاة مع الاجابة

مثال توضيحى ١٦ – ١٠ . احسب الجهد المطلق عند النقطه B التى تقع بجوار الشحنات الثلاثة الموضحة فى شكل ١٦ – ٢٦ .



شكل ١٦ – ٢٦
اوجد الجهد المطلق عند النقطة B .

طريقة الحل : حين تحمل وحده شحنة اختبار موجبة من مالا نهاية الى النقطة B فإن شغلا يبذل ضد ثلاث قوى منفصلة . فهناك شغل مبذول ضد التنافر مع شحنتين موجبتين بينما تميل الشحنة السالبة ، بالطبع ، الى جذب شحنة الاختبار الموجبة نحو B . لذا فالشغل المبذول يتكون من كميتين موجبتين من الشغل ، بذلتا ضد تنافر الشحنات الموجبة وكمية سالبة من الشغل الذى يبذل على شحنة الإختبار نتيجة جذب الشحنة السالبة لها . وكل من هذه الكميات يمكن ايجاده باستخدام المعادلة (١٦-٦)

الشغل الناشيء عن الشحنة $+5 \times 10^{-8}$: هو $V_1 = (9 \times 10^9)\left(\frac{5 \times 10^{-8}}{0.10}\right) = 4500\ \text{V}$

الشغل الناشي عن الشحنة $+8 \times 10^{-8}$: هو $V_2 = (9 \times 10^9)\left(\frac{8 \times 10^{-8}}{0.10}\right) = 7200\ \text{V}$

الشغل الناشيء عن الشحنة -40×10^{-8}: هو $V_3 = -(9 \times 10^9)\left(\frac{40 \times 10^{-8}}{0.20}\right) = -18{,}000\ \text{V}$

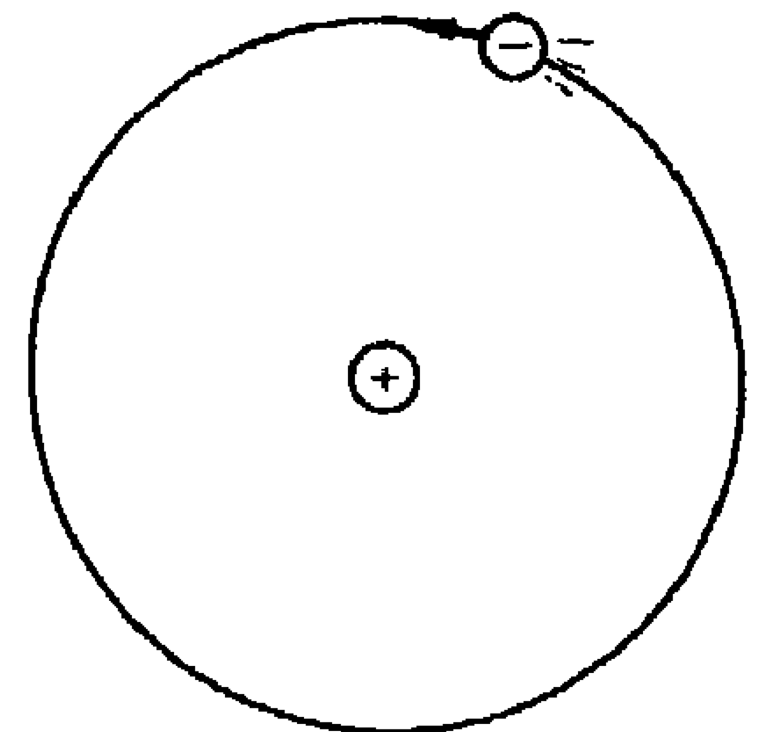
على النقيض من القوى او المجالات فإن الشغل والجهد كميات قياسية وليست موجهة لذا فكونها مجرد أرقام بدون اتجاه فإنه يمكن جمع هذه الكميات حسب اشارتها السالبة أو الموجبة . وعلى هذا تكون النتيجة للجهد المطلق عند B هى $V_B = V_1 + V_2 + V_3$ ولذا

$$V_B = -6300\ \text{V}$$

حيث أن هذه النتيجة سالبة ، فاننا نستنتج أن وحدة الشحنات الموجبة لها فعلا وضع عند B أقل مما لها فى المالانهاية وهذا يجب أن يعنى أن تأثير تجاذب الشحنة السالبة معها كان أقوى من تنافرها مع الشحنتين الموجبتين .

مثال توضيحى ١٦ – ١١ : تتكون ذرة الأيدروجين من الكترون يدور فى مدار حول البروتون كما هو موضح تخطيطيا فى شكل ١٦ – ٢٧ . يقع الالكترون على بعد نصف قطر مقداره $r = 0.53 \times 10^{-10}\text{m}$ من مركز البروتون . اوجد الشغل المبذول فى جذب الالكترون من مداره ودفعه الى مالا نهاية أى اللازم لفصل الالكترون عن الذرة ليصبح طليقا .

شكل ١٦ – ٢٧
يصور الإلكترون فى ذرة الأيدروجين دائما على أنه يدور فى مدار حول البروتون



طريقة الحل : دعنا نعتبر أولا بروتونا منفصلا . الموقف هنا يشبه ما سبقت مناقشته فيما يتعلق بالشكل ١٦ – ٢٥ . ونذكر أن الجهد المطلق عند النقطة B يعطى بالمعادلة (١٦ – ٦) حيث $V = kQ/r$ وهذه الكمية حسب التعريف ، هى فرق الجهد بين المالانهاية والنقطة B .

فى الحالة الراهنة ستكون النقطة B واقعة على مدار الالكترون بحيث يكون $r = 0.53 \times 10^{-10}$m وتكون الشحنة Q على البروتون هى 1.6×10^{-19} بالتعويض بهاتين الكميتين نجد :

$$V = k\frac{Q}{r} = 27.2 \text{ V}$$

هذه الكمية هى فرق الجهد بين موقع الإلكترون ومالانهاية .

لو كان علينا أن نجذب الإلكترون الى مالا نهاية للزم أن نحمله خلال هذا الفرق فى الجهد . ولكن المعادلة (١٦ — ٥) تفيد بأن الشغل المبذول فى مثل هذه الحالة يكون :

الشغل = q × فرق الجهد

حيث q هى شحنة الالكترون

وفى هذه الحالة يصبح الشغل :

الشغل = $(27.2 \text{ V})(1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) = 4.3 \times 10^{-18} \text{ J}$

حيث استخدمت حقيقة أن شحنة الالكترون هى -1.6×10^{-19}C

كما نرى فان الكمية 4.3×10^{-18}J من الشغل يجب أن تبذل لفصل الإلكترون عن ذرة الأيدروجين أى لتأيين الذرة . ولكن الإلكترون له أصلا طاقة حركة KE أثناء دورانه فى المدار وهو بهذا يساعد فى بذل الشغل .. ولكن طاقة حركة الإلكترون تبلغ نصف كمية الشغل الكلى الواجب بذله .. وبناء عليه فإن العامل الخارجى يمكنه جعل ذرة الأيدروجين تتأين ببذل نصف كمية الشغل المحسوبة سابقا . 4.3×10^{-18}J .

ملخص :

هناك نوعان من الشحنة مميزان بالعلامتين + و — يحمل الالكترون شحنة مقدارها $-e = -1.6 \times 10^{3}$C بينما يحمل البروتون شحنة مقدارها $e = 1.6 \times 10^{-19}$C. تتنافر الشحنات المتشابهة مع بعضها البعض والشحنات المختلفة تتجاذب .

تعطى القوة المؤثرة على شحنة q_1 على مسافة r من شحنة نقطية أخرى q_2 بقانون كولوم :

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

حيث تقاس q_1 q_2 بالكولوم أما $k \approx 9 \times 10^{9}$ بوحدات SI .

شدة المجال الكهربائى E فى نقطة ماهى القوة المؤثرة على وحدة شحنة اختبار موجبة عند تلك النقطة . وتكون وحداتها هى نيوتن لكل كولوم أو فولت لكل متر . تمثل المجالات الكهربية بخطوط المجال التى هى مماسات للكمية E . تنبع هذه الخطوط من الشحنات الموجبة وتنتهى عند الشحنات السالبة . يكون المجال أشد مايمكن حيث تكون الخطوط أكثر تقاربا .

تحت الظروف الالكتروستاتية يكون المجال فى داخل جسم معدنى صفرا . وتنتهى خطوط المجال عند سطح المعدن وتكون عمودية على السطح . تستقر الشحنات الفائضة فى جسم معدنى على سطح هذا الجسم .

المجال الكهربائى الساكن هو مجال احتفاظى ، وحسب ، التعريف يكون فرق الجهد من A الى النقطة B هو الشغل المبذول فى حمل وحدة شحنة اختبار موجبة من A الى B وتكون وحداته هى جول لكل كولوم أو فولت **Joules per coulombs or volts** وتمثل بالمقدار $(V_B - V_A)$. اذا كان الخط الواصل بين B و A على طول اتجاه مجال ثابت E فإن متجه فرق الجهد يكون Ed حيث d هى المسافة من A الى B .

خطوط واسطح وحجوم تساوى الجهد تتكون من نقط تقع جميعها عند نفس الجهد . تتقاطع خطوط المجال مع خطوط واسطح تساوى الجهد بحيث تكون دائما متعامدة معها .

الجهد المطلق عند نقطة ما هو فرق الجهد بين هذه النقطة المالانهاية . وحسب هذه الإصطلاحات فإن النقط الواقعة فى المالانهاية يكون جهدها الكهربى صفرا . والجهد المطلق على مسافة r من مركز شحنة نقطية q هو kq/r

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تذكر ماهما نوعا الشحنة وأيهما يوجد على البروتون وأيهما على الالكترون وأن تصف القوة التى تؤثر بها شحنة على الأخرى .

٢ – أن تميز بين العوازل والموصلات وأشباه الموصلات .

٣ – أن تشرح كيف يمكن شحن جسم بالتوصيل وبالحث وأن تصف ، كيفيا ، طريقة توزيع الشحنات على جسم معدنى حين يقترب منه جسم مشحون .

٤ – أن تذكر النتائج التى يمكن استخلاصها من تجربة دلو الثلج لفاراداى .

٥ – أن تستخدم قانون كولوم فى ايجاد القوة المؤثر على شحنة معينة موجودة بجوار شحنات نقطية أخرى .

٦ – أن تشرح ماهى المعلومات التى يمكن جمعها من رسم مجال كهربائى . ومن هذا تعرف E. . وتشرح كيف ترسم خطوط المجال وتذكر كيف تتصرف هذه الخطوط بالقرب من شحنات نقطية وكذا بجوار وداخل المعادن .

٧ – أن تستعمل العلاقة $F = qE$ فى مواقف بسيطة .

٨ – أن تخطط وترسم خطوط المجال الكهربائى بجوار اجسام بسيطة مشحونة

٩ – ان تعرف ماهو المقصود بشحنة الإختبار وتستخدمها لتعريف فرق الجهد الكهربائى بين نقطتين .

١٠ – أن تحسب فرق الجهد بين نقطتين محددتين فى مجال كهربائى ثابت . وأن توضح أسطح وخطوط متساوى الجهد فى حالة بعض المواقف البسيطة التى تتضمن أجساما مشحونة محددة .

١١ – أن تستخدم العلاقة $W = (V_B - V_A)q$ فى مواقف محددة بسيطة .

١٢ – أن تشرح بالكلمات ماهو المقصود بالجهد المطلق عند نقطة ما . وان تعطى قيمته عند مسافة محددة من شحنة نقطية . أن توجد الجهد المطلق عند نقطة ما نتيجة لوجود العديد من الشحنات النقطية بالقرب من تلك النقطة .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

$e = 1.602 \times 10^{-19}$ C

العوازل مقابل الموصلات ، أشباه الموصلات

المكشاف الكهربائى (الالكتروسكوب)

الأرضية الكهربائية

الشحنة المتكونة بالحث
تجربة دلو الثلج لفازاداى

قانون كولوم
الشحنات الفائضة تشكل كسرا صغيرا من الشحنة الكلية .
المجال الكهربائى والكميه E
فرق الجهد الكهربائى
المجال الكهربائى الساكن مجال احتفاظى
متساويات الجهد
الجهد المطلق عند نقطة ما

أسئلة وتخمينات

١ – يمكن اكساب مشط أو مسطرة من البلاستيك شحنة ساكنة معينة عن طريق دلكه بشدة بقطعة من القماش الجاف . كيف يمكنك تحديد اشارة الشحنة المتكونة على المشط أو المسطرة ؟

٢ – اذا شحن مشط أو قلم رصاص من البلاستيك بالطريقة المشار اليها فى ١ – فإنه يقوم بجذب قصاصات صغيرة من الورق . اشرح السبب أ(تلميح : اذا كان الورق على درجة ضئيلة من الرطوبة فإنه يوصل الكهرباء بشكل ضئيل) عند مسح أسطوانه الحاكى بقطعة من القماش الجاف فإنها عادة تجذب الغبار والنسالات لماذ ؟

٣ – أحيانا يصبح جسدك كله مشحونا حين تمشى على سجادة عميقة النسيج أو إذا انزلقت فى مقعد السيارة البلاستيك . لو أنك عندها مددت اصبعك نحو المقبض المعدنى لباب السيارة فإن شرارة تقفز منه . اشرح .

٤ – كيف يمكنك شحن جسم معدنى بشحنة موجبة باستخدام مشط من البلاستيك ذى شحنة موجبة أو باستخدام قلم من البلاستيك مشحونة بشحنة سالبة ؟

٥ – النقطتان A و B موجودتان عند نفس الجهد . هل يعنى هذا بالضرورة انه لايبذل أى شغل فى نقل شحنة اختبار موجبة من نقطة لأخرى ؟ وهل يعنى هذا أنه لاتلزم قوة لنقل شحنة الاختبار من نقطة لأخرى ؟ اشرح

٦ – هل يمكن أن يتقاطع سطحان من أسطح متساوى الجهد ؟ اشرح .

٧ – اثبت أن جميع النقط فى قطعة من المعدن تقع عند نفس الجهد لو انه لم يكن هناك تيار يمر فى المعدن .

٨ – يكون الجهد المطلق فى نقطة تقع فى منتصف المسافة بين شحنتين نقطيتين متساويتين ومتضادتين مساويا صفرا . هل يمكنك ايجاد طريق واضح بحيث لايبذل على طوله أى شغل أثناء حمل شحنة اختبار موجبة من مالا نهاية الى هذه النقطة ؟ أشرح .

٩ – بادئا من الحقيقة القائلة بأن قطعة المعدن التى ليس بها تيار يسرى هى بالفعل جسم متساوى الجهد ، اثبت أن المجال الكهربائى داخل قطعة مجوفة من المعدن صفر .

١٠ – ارسم المجال الكهربائى بين سحابة مشحونة بشدة وعمود للبرق مثبت فوق مبنى لماذا يجب أن يتصل العمود بأمان كبير بالأرض .

١١ – علق مكعب من المعدن بخيط معزول . فلو كان المكعب مشحونا بشحنة موجبة فماهى – بالتقريب – كيفية توزيع الشحنات عليه ؟

١٢ – اذا كانت $V = 0$ فى نقطة مافهل من الضرورى أن تكون E صفرا كذلك ؟

١٣ – ماذا يمكن أن يقال عن E فى منطقة يكون فيها V ثابتا ؟

١٤ – برهن على أن جميع النقط فى جسم معدنى تقع عند نفس الجهد تحت ظروف الكتروستاتية

مسائل

١ – شحنتان نقطيتان $+6\times10^{-5}C$ و $+2\times10^{-5}C$ بينهما مسافة مقدارها $0.30\ m$ أوجد القوة المؤثرة على أى منهما .

٢ – شحنة نقطية $8\times10^{-6}C$ موضوعة على محور x عند $x=0$ بينما وضعت شحنة نقطية مجهولة على نفس المحور عند $x=50\ cm$. فإذا كانت القوة المؤثرة على الشحنة المجهولة هى $300\ N$ ، إوجد إشارة ومقدار الشحنة المجهولة .

٣ – فى نموذج بوهر لذرة الأيدروجين يقوم الإلكترون بالدوران حول النواه (بروتون)،نصف القطر قدره $0.53\times10^{-10}m$ أ) ماهى القوة التى يؤثر بها البروتون على الإلكترون ؟ (ب) تقوم هذه القوة بتوفير قوى الجذب المركزى التى تمسك بالإلكترون فى الجدار . ماهى سرعة الإلكترون فى المدار ؟ (الشحنات على كل جسيم هىe.) كتلة الالكترون $m=9.1\times10^{-31}\ kg$)

٤ – وضعت الشحنات الثلاث الآتية على محور x: $+4\ \mu C$ عند $x=0$، $+2\ \mu C$ عند $x=30\ cm$، $+6\ \mu C$ عند $x=60\ cm$
أوجد : أ) القوة المؤثرة على الشحنة$+2\ \mu C$ ب) القوة المؤثرة على الشحنة$6\ \mu C$-

٥ – وضعت أربع شحنات نقطية كما يوضح الشكل (م١٦ – ١) عند الأركان الأربعة لمربع اذا كانت $q_1=q_2=q_3=q_4=5\ \mu C$ و $a=30\ cm$ اوجد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على q_3 .

٦ – فى منطقة معينة من الفضاء كانت كرة دقيقة من النخاع ذات شحنة $-3.0\times10^{-12}C$ تتعرض لقوة مقدارها $5.0\times10^{-7}N$ فى اتجاه $+x$. ماهو مقدار واتجاه المجال الكهربى فى تلك المنطقة ؟

٧ – وضعت شحنتان على محور x: $+6\ \mu C$ عند $x=60\ cm$، $-3\ \mu C$ عند $x=0$ اوجد المجال الكهربى عند أ) $x=30\ cm$ (ب) عند $x=100\ cm$

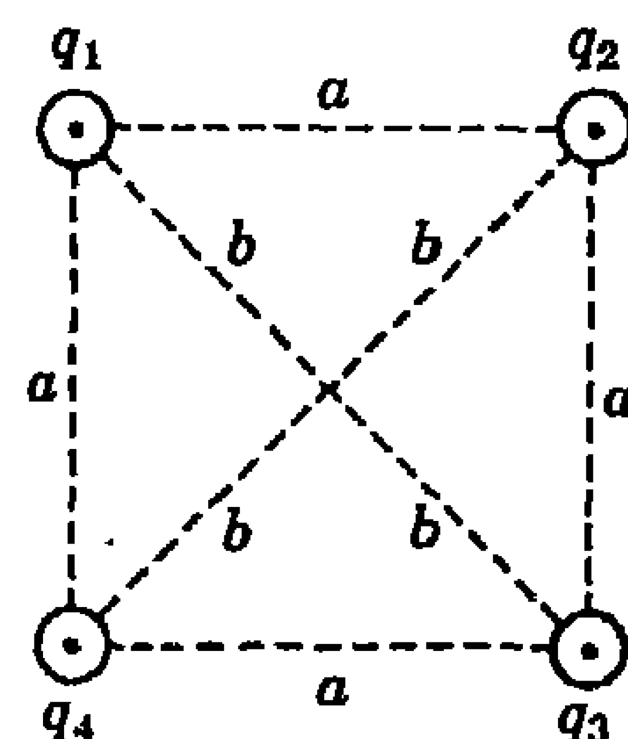
٨ – اوجد شدة المجال الكهربائى عند مركز المربع الموضح فى الشكل (م١٦ – ١) اذا كان :
أ) $q_1=q_2=q_3=q_4$ (ب) $q_1=q_2=2\ \mu C$ و $q_3=q_4=-4\ \mu C$ ، $b=50\ cm$

٩ – اذا كانت $q_1=q_3=-6\mu C$ و $q_2=2\ \mu C$ فى الشكل (م ١٦ – ٢) . فما شدة المجال الكهربى عند النقطة A ؟

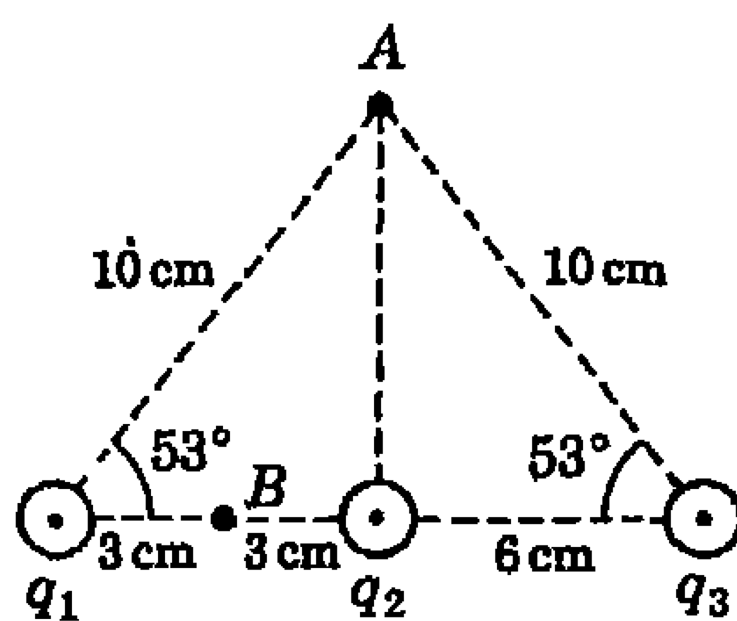
١٠ – ** أ) فى الشكل (م ١٦ – ٢) اذا كانت $q_1=q_2=6.4\ \mu C$ فما هى قيمة q_3 اللازمة لجعل المجال الكهربى عند A متجها على طول الخط الموازى لخط الشحنات الثلاث ؟ ب) ماهى قيمة المجال فى هذه الحالة ؟

١١ – اذا كان فرق الجهد من A الى B هو $60V$ فما هو الشغل اللازم لحمل أ) بروتون $(q=e)$ من A، الى B ب) الكترون $(q=-e)$ من A الى B .

١٢ – لوحان معدنيان متوازيان تفصلهما مسافة قدرها $0.20\ cm$ وهما متصلان ببطارية (6v) . اوجد المجال بين اللوحين .



شكل (م١٦ – ١)



شكل (م١٦ – ٢)

١٣ – وصل لوحان معدنيان متوازيان ببطارية 6V ، فاذا كان المجال بين اللوحين هو 300V/m أ) ماهى المسافة بين اللوحين ؟ (ب) ماهى القوة المؤثرة على الكترون بين اللوحين ؟ شحنة الالكترون هى $-1.6\times10^{-19}C$

١٤ – شحنتان هما $+6\ \mu C$ ، $-3\ \mu C$ تفصلهما مسافة 60 cm اوجد الجهد المطلق عند نقطة تقع فى منتصف المسافة بينهما . ماهو الشغل اللازم لحمل شحنة مقدارها $-3\mu C$ من مالانهاية التى تلك النقطة ؟

١٥ – ماهو الجهد المطلق عند مركز المربع فى الشكل (م ١٦ – ١) (أ) اذا كانت $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 2\ \mu C$ و (ب) اذا كانت $q_1 = q_2 = q_3 = 2\ \mu C$ ، $q_4 = -6\ \mu C$ اعتبر أن $b = 30$ cm.

١٦ – فى الشكل (م ١٦ – ٢) اذا كانت $q_1 = 2\ \mu C$ و $q_2 = -8\ \mu C$ ، $q_3 = +4\ \mu C$ فما هو الجهد المطلق عند النقطة A ؟

١٧ – فى الشكل (م١٦ – ٢) (أ) ماهو فرق الجهد بين النقطتين A ، B اذا كانت $q_1 = +3\ \mu C$; $q_2 = -6\ \mu C$ $q_3 = -9\ \mu C$

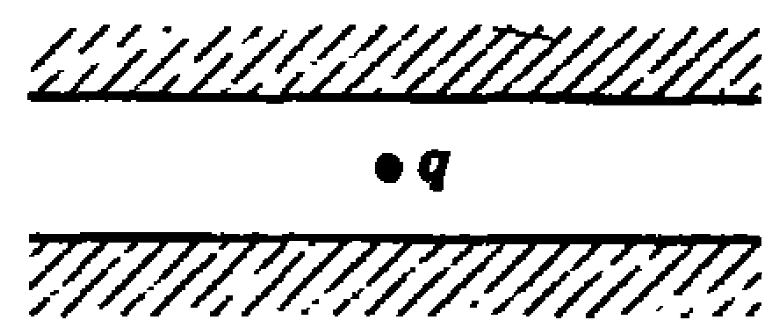
(ب) ماهى قيم V_A V_B ؟

١٨ –* فى الشكل (م١٦ – ٣) هناك جسيم بين لوحين متوازيين ومشحونين بشحنات مختلفة . اعتبر الجسيم الكترونا ($m = 9.10^{-31}$ Kg, $q = -e$) (أ) كم يجب أن يكون المجال الكهربائى بين اللوحين حتى يظل الجسيم ساكنا بلا حركة تحت التأثير المزدوج لقوى الجاذبية والمجال الكهربائى ؟ (ب) هل يجب أن يكون اللوح الأعلى موجبا أم سالبا ؟ (ج) اذا كانت المسافة بين اللوحين هى 2.00 mm فما هو فرق الجهد اللازم بين اللوحين ؟

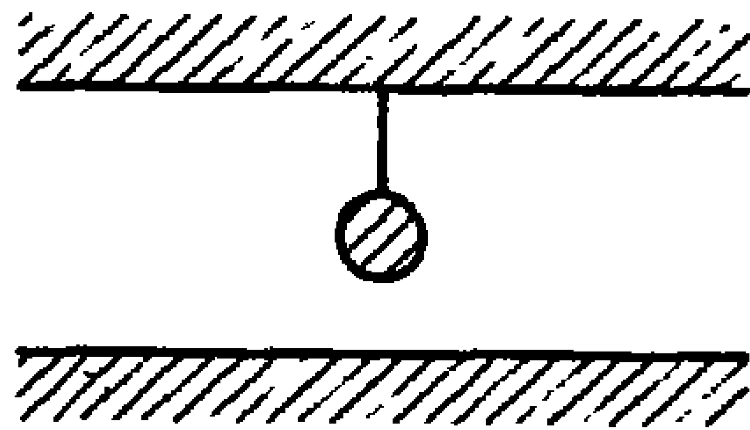
١٩ –اذا كان الجسيم الموجود بين اللوحين فى الشكل (م ١٦ – ٣) ذو كتلة مقدارها 4×10^{-12}g وكان من الممكن جعله ساكنا ضد الجاذبية بوضع فرق للجهد مقداره 245V بين اللوحين بحيث يكون اللوح الأعلى سالبا والمسافة بين اللوحين 2.0 mm فاوجد : (أ) شدة المجال الكهربائى بين اللوحين و (ب) اشارة ومقدار الشحنة التى على الجسيم .

٢٠ –* المسافة التى تفصل بين اللوحين المعدنيين المتوازيين فى الشكل (م ١٦ – ٤) هى 10 cm أما فرق الجهد بينهما فهو 28 V علقت كره صغيره من النخاع كتلتها 0.6 m من اللوح الأعلى ماهو الشد فى الخيط اذا كانت الكرة تحمل شحنة مقدارها $20\ \mu C$ ؟ هناك اجابتان ممكنتان ماهما ؟

٢١ –** وضعت شحنة نقطية مقدارها $+2\ \mu C$ على خط مستقيم محدد بالشحنتين $27\mu C$ و $-3\mu C$ اللتين تفصلهما مسافة 100 cm . (أ) أين يجب وضع الشحنة $-2\mu C$ حتى تصبح محصلة القوة المؤثرة عليها صفرا . (ب) هل الشحنة فى وضع اتزان مستقر أم غير مستقر ؟



شكل م ١٦ – ٣


شكل م ١٦ – ٤

الفصل السابع عشر

عناصر الدائرة وسلوكها

سندرس فى هذا الفصل كيف يؤدى فرق الجهد الى ظهور تيار كهربائى فى الأسلاك وسنتعرف على ثلاثة عناصر رئيسية هى : البطارية ، المقاوم والمكثف وستتم مناقشة المعادلات الرياضية التى تحكم الدوائر التى تحتوى على هذه العناصر وذلك كمقدمة لدراسة دوائر التيار المستمر التى ستبحث فى الفصل التالى .

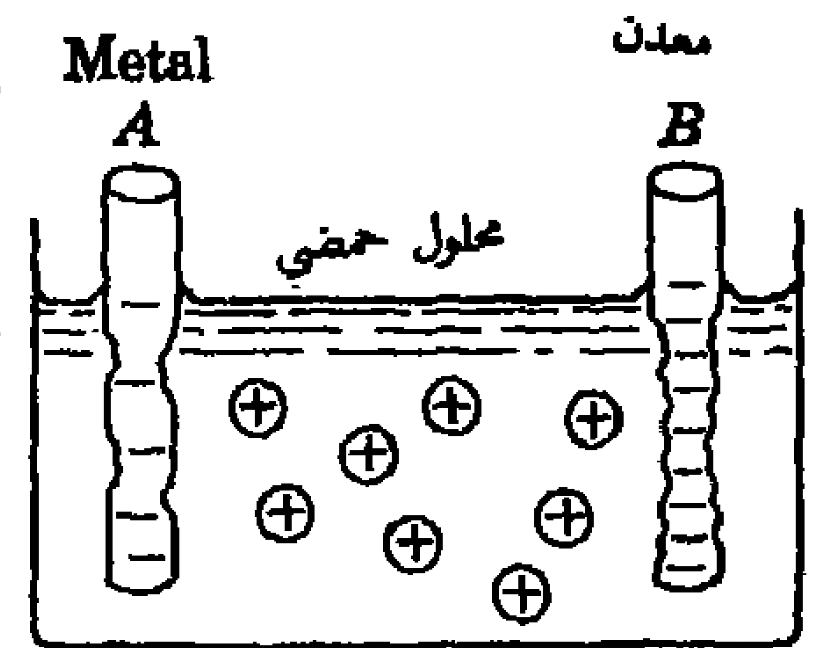
١٧ – ١ البطاريات كمصدر لفرق الجهد

ان الغرض الأساسى لوجود البطارية فى أغلب الدوائر الكهربائية هو امداد هذه الدائرة بالطاقه اللازمه لتشغيلها . وعلى الرغم من أن معظم البطاريات ذات طابع كيميائى ، إلاأن هناك أنماطا أخرى أخذت فى الظهور والإنتشار . والبطارية العادية ذات الخلية الرصاصية وهى ذاتها البطارية المستخدمة فى السيارات تستمد الطاقه من تفاعل كيميائى ، وينطبق نفس الشىء على البطاريه الجافة التى – على الرغم من التسمية – ليست بجافة فى داخلها ، وربما يكون القارىء قد سمع عن البطارية « الشمسيه » التى تستخدم كمصدر للطاقه الكهربائية للأجهزة المستخدمه فى الفضاء . إن هذا النوع الأخير من البطاريات يعمل على اسس مختلفة تماما ويقوم بتحويل الضوء والحرارة مباشرة الى طاقه كهربائية . كما أن هناك انواعا أخرى من البطاريات غير الكيميائية لازالت تحت التطوير .

وفيما يلى سنعتبر البطارية كمصدر للطاقة وفرق الجهد دون النظر الى ما تحتويه بداخلها – إن الخاصية الرئيسية لكل البطاريات المعروفه هى وجود نهايتين (أو عمودين معدنيين موجودين فوق علبه البطاريه) بينهما فرق للجهد . والرمز المستخدم عاده للتعبير عن البطاريه −|⊢ حيث يشير الخط الأطول والمميز بالعلامه (+) الى الطرف الموجب للبطاريه أما الطرف الأقصر والمميز بالعلامه (−) فيشير الى الطرف السالب . وعادة ما ترفع العلامتان (+) ، (−) حيث يتوقع أن يكون القارىء قد استوعب أن الطرف الأطول هو الموجب والأقصر هو السالب (يلاحظ دائما وجودخاتم بعلامه + ، − ، على طرفى البطارية وفى بعض الأحيان يكتفى بدهان الطرف الموجب باللون الأحمر) .

رمز البطارية

إن البطاريه الكيميائية البسيطه يمكن عملها عن طريق غمس قضيبين معدنيين مختلفين فى محلول حمضى مخفف كما هو موضح فى شكل ١٧ – ١ .

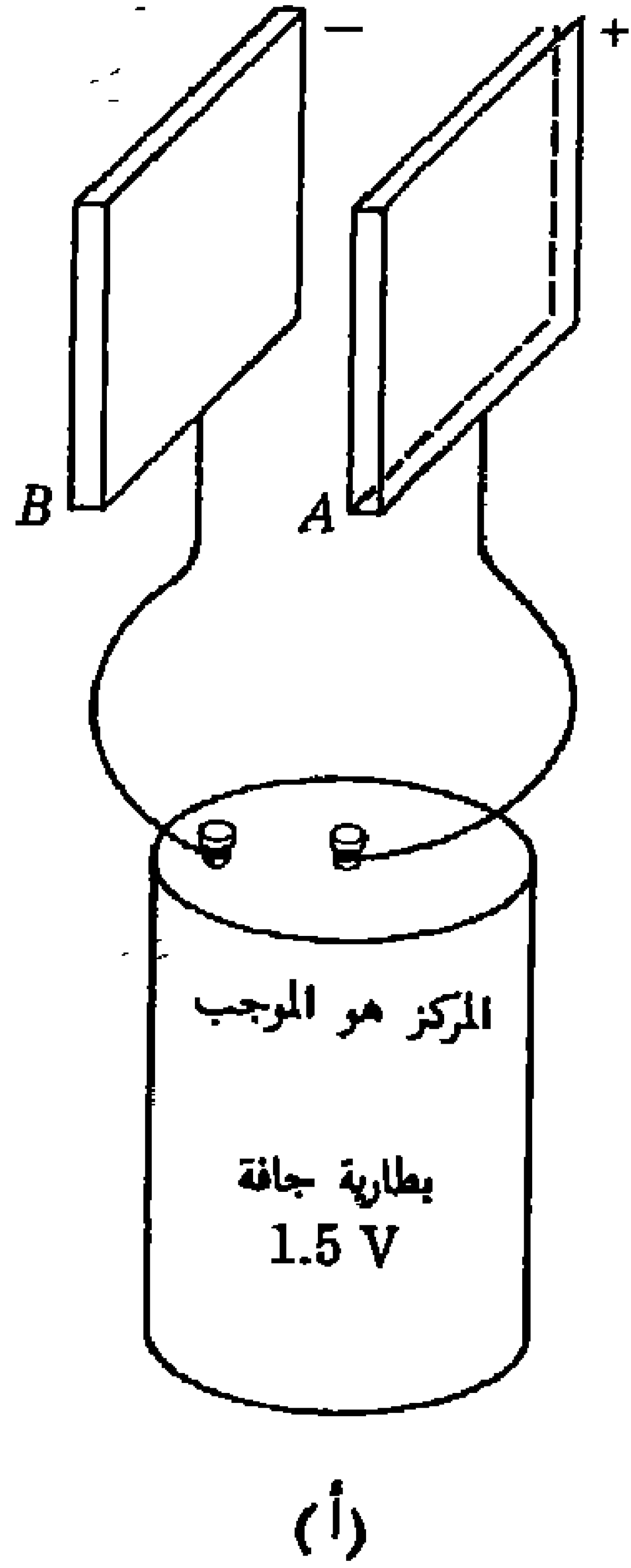


شكل ١٧ – ١
تدخل الأيونات الموجبه الى محلول مخلفه الالكترونات فوق الأقطاب وفى الحالة الموضحة فان المعدن B قد فقد ايونات اكثر من المعدن A (وذلك فى وحـــدة الحجوم) .اى القطبين عند جهد أعلى ؟

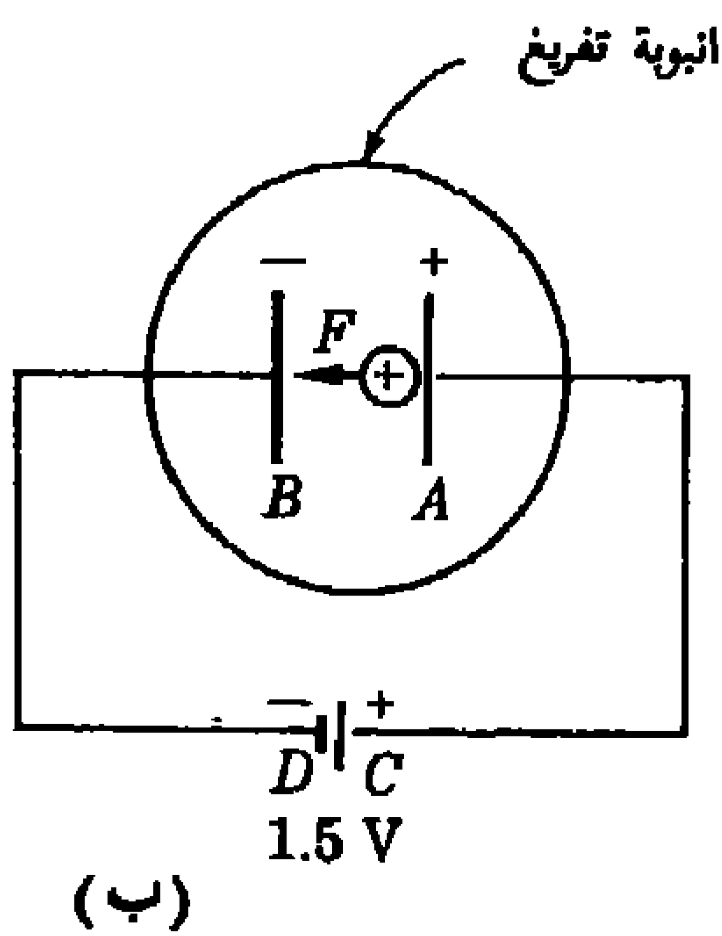
ومعظم المعادن تذوب فى الأحماض بدرجات متفاوته . وعند الذوبان فان ذرات المعادن تترك وراءها الكترونا واحدا على الأقل ملتصقا بالقضيب المعدنى وتدخل هذه الذرات الى المحلول على هيئة أيونات موجبه . أما القصيب المعدنى أو القطب الذى خرج منه الايون فانه يشحن بشحنة سالبه خلال هذه العملية وفى النهاية يصبح القطب سالبا لدرجة أن عددا مماثلا من الايونات الموجبة ينجذب اليه مرة أخرى بحيث يصبح العدد الصافى للأيونات التى تغادر القطب مساويا للصفر . وحيث ان القطب يحتوى على المزيد من الشحنات السالبه لذا يتكون فرق للجهد بينه وبين المحلول .

فى شكل ١٧ - ١ يكون فرق الجهد بين القطب والمحلول اكبر للمعدن B عنه للمعدن A وذلك لأن B يذوب بدرجة اكبر من A . وحيث أن كلا القطبين سالبين ، فإنهما عند جهد اقل من جهد المحلول . على أن المعدن B عند جهد أقل من A ولذا فعند الذهاب من القطب A إلى القطب B فإننا ننتقل من جهد أعلى الى جهد أقل ، ويسمى فرق الجهد هذا **القوة الدافعة الكهربائية** (وهى تسميه خاطئه) أو ق . د ك للبطارية . وعلى هذا فإن القضيب A سيكون هو الطرف الموجب للبطارية اما القضيب B فسيكون الطرف السالب والقوة الدافعة الكهربائية (**ق . د . ك**) لبطارية ستمثل بالرمز ε . ويجب عدم الخلط بينهما وبين الرمز E المستخدم للدلالة على شدة المجال الكهربائى . وعليه فإن القوة الدافعة ε تكون هى فرق الجهد بين طرفى البطاريه حينما تكون هذه البطارية معزوله كهربائيا

تعريف



(أ)



(ب)

شكل ١٧ - ٢

فرق الجهد من B الى A هو 1.5V هو عبارة عن ق . د . ك للبطارية :

١٧ - ٢ حركة الشحنه فى مجال كهربائى

ذكرنا فى القسم السابق أن الغرض الرئيسى للبطارية هو امداد الطاقة ولنحاول الآن دراسة بعض الأمثلة التى توضح كيف تقوم البطارية بمد الشحنات بالطاقه . اعتبر اولا الموقف الموضح فى شكل ١٧ - ٢ أحيث تتصل البطاريه بلوحين معدنيين ، والموقف ذاته موضح باختزال فى الشكل ١٧ - ٢ ب وكما هو واضح فاننا سنعتبر ان اللوحين موجودان فى فراغ .

تقوم البطارية بوضع شحنات زائده على كل من اللوحين . وكما هو موضح فان اللوح A يكون موجبا نظرا لا تصاله بالطرف الموجب للبطارية . وتستغرق عملية نقل الشحنة هذه كسرا ضيئلا من الثانية يصير الموقف بعدها كهروستاتى وكما نذكر فإنه تحت الظروف الكهروستاتية تكون المعادن الصلبة عبارة عن حجوم تساوى الجهد ، وعليه فإن السلك الواصل من C الى A واللوح A نفسه كلها عند نفس الجهد أو قل إنها عند نفس المستوى الكهربائى ، وبالمثل فان النقط D ، B وكذا اللوح B تقع جميعها عند نفس المستوى . ولكن ، النقطة D أقل من النقطة C بما قيمته 1.5V وعليه فان اللوح B منخفض فى الجهد عن A بمقدار 1.5V ، اى ان فرق الجهد بين B الى A مقداره 1.5V والنقطة A عند المستوى الأعلى .

افترض الآن أن شحنة موجبة قد حررت من اللوح A كما هو موضح فى الشكل ١٧ - ٢ب ومن الطبيعى ان تتنافر هذه الشحنة مع اللوح A وتتجذب ناحية اللوح B اى أنها تتسارع من A الى B . وكما نرى فإن الشحنة الموجبة « تنحدر » من اللوح A ذى الجهد العالى الى اللوح B ذى الجهد المنخفض .

تنحدر الشحنات الموجبه من الجهود العالية نحو الجهود المنخفضة

والآن لنر كم من الطاقه يكتسب حين تسقط الشحنه من A الى B .

نذكر من الباب السابق أن الشغل المطلوب لحمل شحنه موجبة الى« أعلى التل » خلال فرق الجهد V يمكن حسابه كما يلى . حين يكون اللوح A عند جهد اعلى من جهد B بمقدار V حيث $V = 1.5$ V، فإن حمل شحنه q من B الى A يتطلب شغلا مقداره qV(وهذا ينتج من أن V هو الشغل المطلوب لحمل وحدة الشحنات الموجبه من B الى A) .

ولكن حين تتحرر شحنه q عند اللوح A وتنحدر نحو B فإنها بالتالى تسترد كميه من الطاقة مساويه لهذا الشغل ، وعلى هذا نرى أن :

حين تنحدر شحنه q خلال فرق للجهد V ، فإنها تكتسب طاقة قيمتها qV .

ولنحاول الآن الإفادة من هذه الحقائق فى دراسة الأمثلة التاليه :

مثال توضيحى ١٧ – ١ : اذا كانت الشحنة الموجبة فى شكل ١٧ – ٢ب بروتونا $(m = 1.67 \times 10^{-27}\text{kg}, q = +e)$ وحررت هذه الشحنة عند اللوح A فما هى سرعتها قبيل أن تصطدم باللوح B ؟

طريقة الحل تنحدر الشحنه خلال فرق للجهد $V = 1.5$v ولذا تكتسب طاقة مقدارها qV حيث $q = 1.6 \times 10^{-19}$C . وتظهر هذه الطاقة كزيادة فى طاقة حركة البروتون . ولما كانت السرعة الابتدائية للبروتون صفرا ، فإن ،

$$\text{الزيادة فى الطاقة الحركية KE} = \tfrac{1}{2}mv_f^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2 = \tfrac{1}{2}mv_f^2$$

وحيث أن هذه الزيادة تساوى qV ، لذا

$$qV = \tfrac{1}{2}mv_f^2$$

ومنها نجد أن :

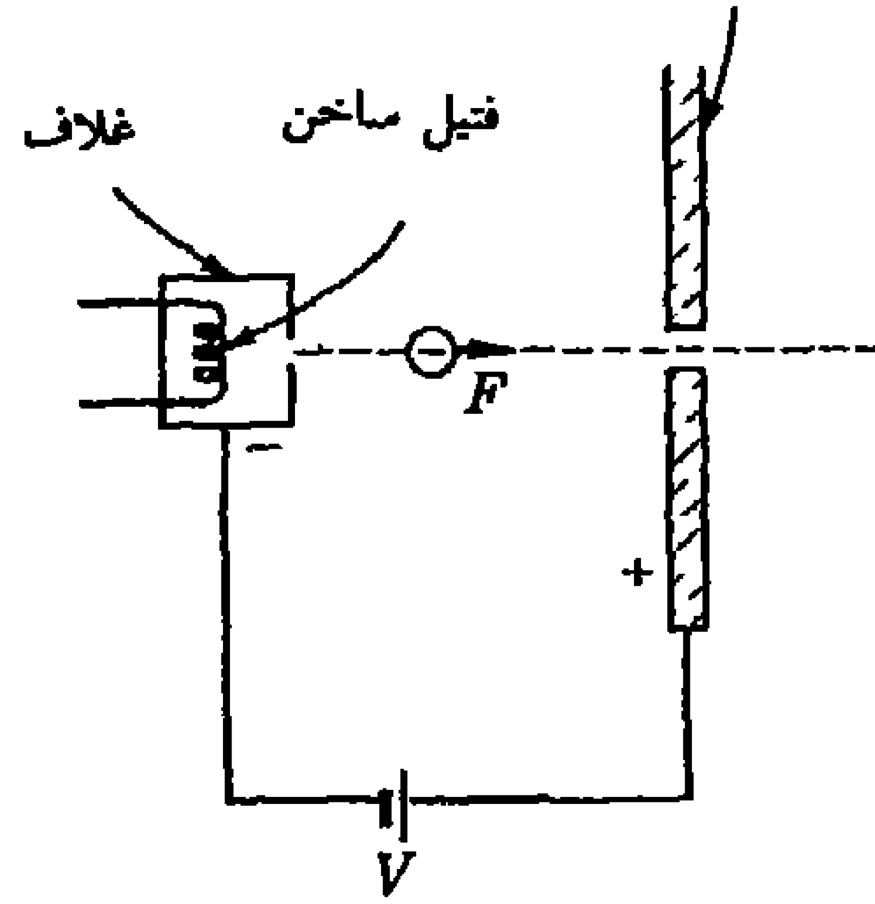
$$(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(1.5\ \text{V}) = \tfrac{1}{2}(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})v_f^2$$

والحل يعطينا $v_f = 1.7 \times 10^4$ m/s وهنا نلاحظ مدى السرعة الهائلة التى يتحرك بها البروتون وهوينحدر فى هذا الفرق الضئيل فى الجهد .

مثال توضيحى ١٧ – ٢ يعطى كثير من الآلات الإلكترونية صورا مرئية للإشارات الكهربائية ومثال ذلك الصور التى تظهر على شاشه التليفزيون . وللحصول على مثل هذه الصور يقوم مدفع الكترونى بقذف شعاع من الإلكترونات نحو مادة فلورية عند نهاية الأنبوبه وحين يقوم الشعاع بالمسح للتكرر عبر وجه الأنبوبة فإنه بهذا يرسم

مدفع الكترونى

الصورة التى نراها . ويوضح شكل ١٧ – ٣ مدفعا الكترونيا مبسطا جدا . تتطاير الإلكترونات – اثناء غليانها – من فتيلة مسخنه لدرجة الإبيضاض وهى داخل غلاف معدنى ، ويتجول العديد من هذه الالكترونات خارج الغلاف المعدنى لينفذ من فتحة دقيقه كما هو موضح . وعند ذلك « ترى » الإلكترونات ان الغلاف سالب الشحنه وأن اللوح الذى الى اليمين موجبا فتتسارع اليه . فإذا ما وصلت الإلكترونات الى اللوح تكون سرعتها قد أصبحت كبيرة للغاية فتندفع بعض الإلكترونات خلال الفتحة الدقيقه التى فى منتصف اللوح . نتيجة لهذا يصبح لدينا شعاع دقيق من الإلكترونات (من الناحية العملية ، يكون تركيب المدفع الالكترونى اكثر تعقيدا عما هو موضح بالرسم) .



شكل (١٧ – ٣)
يقوم المدفع الإلكترونى بقذف شعاع من الإلكترونات نحو اليمين . فى انبوبه التليفزيون النمطية يكون المدفع الإلكترونى اكثر تعقيدا عن الموضح بالشكل . يقوم الشعاع الإلكترونى بالإنتقال فى الفراغ ويصطدم فى النهاية بالستار الفلورى التى توضع فى أقصى اليمين .

يبلغ فرق الجهد الذى تتسارع خلاله الشحنات فى أنبوبة جهاز تليفزيون حوالى 20,000 V اوجد سرعة الالكترونات التى تخرج من المدفع الالكترونى .

طريقة الحل : نلاحظ فى هذه الحالة أن الشحنات تنحدر من – الى + حيث يسلك الإلكترون – وهو سالب الشحنة سلوكا معاكسا للشحنات الموجبه . على أنه فى كلتا الحالتين يكون التغير فى طاقة الحركة KE للجسيم ذى مقدار هو $|qV|$ ولذا فبوضع $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C و $V = 2 \times 10^4$ V فإن :

$$\text{التغير طاقة الحركة} = (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(2 \times 10^4\ \text{V}) = 3.2 \times 10^{-15}\ \text{J}$$

ولكن الالكترون كان ذا طاقة حركة ابتدائية KE مهمله وعليه فطاقة حركته النهائية $\frac{1}{2}mv_f^2 =$ KE تصبح مساوية 3.2×10^{-15} . وحيث أن كتلة الالكترون $m = 9.1 \times 10^{-21}$ Kg فإن

$$v_f = \sqrt{\frac{3.2 \times 10^{-15}\ \text{J}}{\frac{1}{2}(9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})}} = 8.4 \times 10^7\ \text{m/s}$$

وكما نرى فإن هذه القيمة تقترب من سرعة الضوء 30×10^7 m/s والنتيجة التى حصلنا عليها بهذه الطريقة ليست دقيقة تماما حيث أن كتلة الجسيمات لم تعد مساوية لكتلة السكون لها : (مناقشة هذا الموضوع ستكون مفصلة فى الفصل السادس والعشرين) وعندما نعالج الموقف فى ضوء النظرية النسبية سنجد أن $v_f = 801\times 10^7$ m/s. اى انه يمكن بسهولة تعجيل الإلكترونات الى ذلك الحد الذى تظهر فيه تأثيرات النسبية .

١٧ – ٣ الالكترون – فولت كوحدة للطاقة

نحتاج عند دراستنا للفيزياء الذرية الى معرفة طاقة الإلكترون والجسيما المماثلة بشكل مستمر وفى أغلب الأحوال تكتسب هذه الطاقة من حركة الجسيمات المشحونة خلال فرق للجهد الكهربائى وعلى سبيل المثل ، فلإزالة الإلكترون الوحيد ذرة الايدروجين يجب امداده بكميه من الطاقة تكافىء مايمكن أن يكتسبه الإلكترون لو انحدر فى فرق للجهد مقداره 13.6 V . وبصورة أخرى فإن الطاقة اللازمة لتأيين ذرة الايدروجين أى نزع الالكترون عنها تساوى Vq حيث $V = 13.6$ V بينما q هى شحنة الالكترون 1.6×10^{-19}C وهذه الطاقة تساوى $2\text{-}18\times 10^{-18}$J .

ليس من المناسب أن نضرب V فى q فى كلما تحدثنا عن طاقة جسيم انحدر فى فرق للجهد ولذا نلجأ الى تعريف وحدة جديدة للطاقة تدعى **الإلكترون – فولت** (eV) تعرف هذه الوحدة كما يلى

وحدة الالكترون فولت

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

حيث 1.6×10^{-19}C هوكم الشحنة . وحيث ان طاقه شحنه q' انحدرت فى فرق للجهد V هى Vq joules فإننا نجد :

$$\text{الطاقة بوحدات eV} = \frac{\text{الشحنة} \times \text{فرق الجهد}}{\text{كم الشحنه}}$$

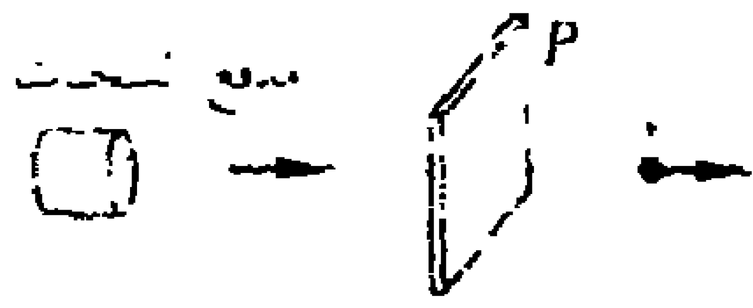
وكأمثلة نموذجيه نجد ان الالكترون الذى ينحدر فى فرق للجهد مقداره 2 million Volts (MV) ، تكون طاقته 2×10^6eV أو 2 MeV حيث تعتبر MeV عن لفظ ميجا (او مليون) الكترون فولت . أما جسيم ألفا (وشحنته 3.2×10^{-19} أو مقدار كمَّان من الشحنه) فطاقته تصبح 4MeV حين ينحدر فى فرق للجهد مقداره 2×10^6V . ومن الواضح ان وحدة الالكترون فولت ليست

من وحدات SI تماما ولذا وجب تحويلها دائما الى وحدات الجول Joules (وذلك ضربها فى 1.6×10^{-19} قبل استخدامها فى المعادلات الاساسية .

١٧ - ٤ التيار الكهربائى

رأينا فيما سبق ان معظم ماعرفناه فى الكهربية قد تم على أساس الشحنات الموجبه لا السالبه : ويرجع السبب فى هذا الى مايلى :

عند بداية القرن الثامن عشر (منتصف العشر الأولى من ١٧٠٠) ، عندما كانت الكهرباء مجرد فضول وحب استطلاع ، كانت الأبحاث فيها تجرى كهواية فقط ، وقد كان أحد اولئك الباحثين « بنيامين فرانكلين » الذى توصل الى العديد من الاكتشافات المتعلقة بالكهرباء وكان اول من صمم عمود البرق . وبالإضافة الى ذلك كان من اوائل المؤيدين لفكرة انتقال الشحنات من البطارية خلال الأسلاك وقد افترض أن هذه الشحنات لابد أن تكون موجبه .



شكل ١٧ ٤
شعاع من الشحنات المتحركة يمر خلال ثقب فى اللوح P اذا مرت شحنة مقدارها ΔQ فى زمن قدره Δt خلال الثقب فإن التيار يساوى $\Delta Q/\Delta t$

وقد استغرق الأمر قرابة قرن من الزمان لاثبات خطأ اختيار فرانكلين ، فنحن نعرف الآن أن الالكترونات ، وهى شحنات سالبه ، هى التى تسرى فى الاسلاك على الرغم من صعوبه اثبات ذلك بطريقة مباشره . وفى معظم التجارب يكون سريان الشحنات السالبه فى احد الاتجاهات مكافئا لسريان شحنات موجبه فى الاتجاه المضاد ، وهذا لايجعل هناك سببا لإعادة النظر فى التعريفات القائمة بحيث اننا سنظل نعطى الأولوية للشحنات الموجبه عند تعريف الكميات الكهربائية المختلفة ولنر الآن كيف يمكن تعريف معدل سريان الشحنات المتحركه .

اذا مارجعنا الى الشكل ١٧ - ٤ ، رأينا شعاعا من الشحنات الموجبه متجها الى اليمين بعد انطلاقه من مدفع خاص للشحنات الموجبه . ينطلق الشعاع من ثقب فى اللوح P وأمامنا الآن ايجاد تعريف لكمية تقيس عدد الشحنات التى تمر خلال هذا الثقب كل ثانية . وسندعو هذه الكميه - التيار الكهربائى الذى يحمله الشعاع كما سنرمز له بالرمز I . اذا حملت كميه من الشحنه مقدارها ΔQ عبر نقطة معينه بواسطة الشعاع ، فى زمن قدره Δt فإن التيار الناتج يكون .

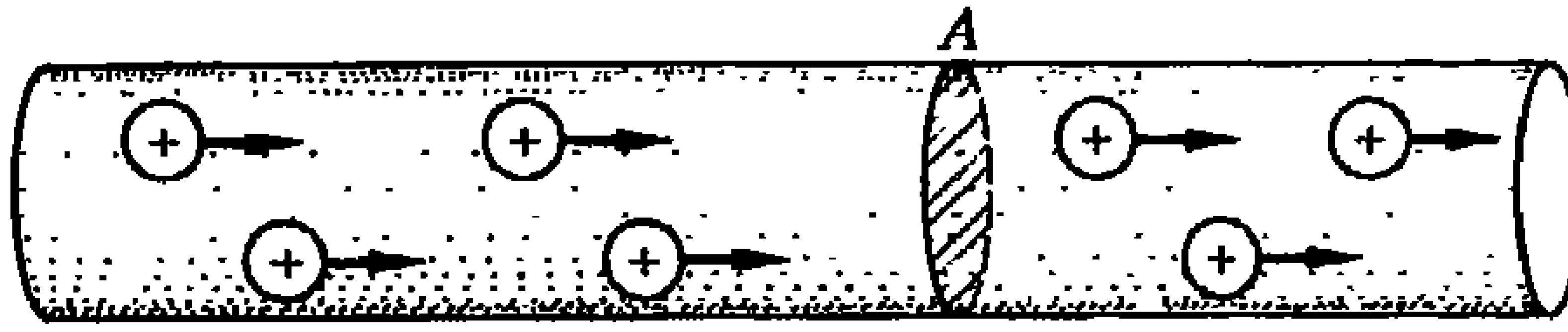
تعريف

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad (١ - ١٧)$$

التيار الكهربائى

وحدات التيار الكهربائى وهى كولوم لكل ثانية Coulomb per second تعطى اسما آخر وهو **الأمبير** amperes A وهنا نلاحظ انه اذا كانت الشحن المتحركه موجبه فإن كلا من ΔQ ، I سيكونان موجبين ، اما اذا كانت الشحنه سالبه كان ΔQ ، I سالبين ولهذا السبب فإن :

سريان الشحنات السالبه يؤدى الى تيار فى اتجاه مضاد لاتجاه السريان على الرغم من أن اشعة الشحنات قد اصبحت شائعه (كما فى اجهزة التليفزيون) إلا أننا قد اعتدنا على سريان الشحنات خلال الأسلاك ، ولمعرفة كيفية تعريف التيار فى هذه الحالة فإننا نرجع الى الشكل ١٧ — ٥ . وهناك العديد من الالكترونات الحرة داخل معدن ما وعندما يؤثر مجال كهربى ، فإن هذه الالكترونات تتحرك خلال المعدن .



شكل ١٧ — ٥
يعرف التيار المار فى السلك بالأمبير على انه كمية الشحنة الموجبه بالكولوم والتى تسرى خلال المقطع A فى ثانية واحدة .

ويوضح الشكل هذه الحركة . وفى ضو تأكيداتنا على الشحنات الموجبة فإن التعريف يجب أن يصاغ بدلالة الشحنات الموجبه .

تعريف اذا كانت ΔQ كمية من الشحنات التى تمر خلال مقطع معين من سلك (مثل A فى الشكل) فى زمن قدره Δt ، فإن التيار المار فى السلك يكون

التيار فى سلك

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

ويقاس التيار بالأمبير (A) . وكما فى حالة شعاع الشحنات فان التيار يكون مضادا فى اتجاه سريان الشحنات السالبه . وتجدر ملاحظة ان I هى كمية الشحنة التى تمر بنقطه معينة فى السلك كل ثانية بشرط ان يكون التيار منتظما .

مثال توضيحى ١٧ — ٣ يمر تيار مقداره 3.2 A خلال سلك فكم من الالكترونات تمر عبر نقطة معينه على السلك فى الثانية ؟

طريقة الحل : اذا عرفنا الشحنه الكليه التى تمر عبر هذه النقطه فإنه يمكن بقسمتها على شحنه الالكترون ، معرفه عدد الالكترونات . وحيث ان I هى عدد الكولومات التى تمر عبر نقطة على السلك فى الثانية فإن لدينا 3.2C من الشحنه تمر عبر النقطه فى الثانيه . ولكن كل الكترون يحمل شحنه مقدارها 1.6×10^{-19}C وعليه فان عدد الالكترونات التى تمر فى الثانيه يكون :

$$\text{العدد} = \frac{3.2}{1.6 \times 10^{-19}} = 2 \times 10^{19} \text{ الكترونا}$$

وهذا بالطبع رقم هائل جدا بحيث ان اية محاوله لتتبع أثر الكترون واحد يتحرك عبر السلك تعتبر شيئا لاطائل تحته . على ان هناك بعض الحالات التى تظهر فيها آثار واضحه

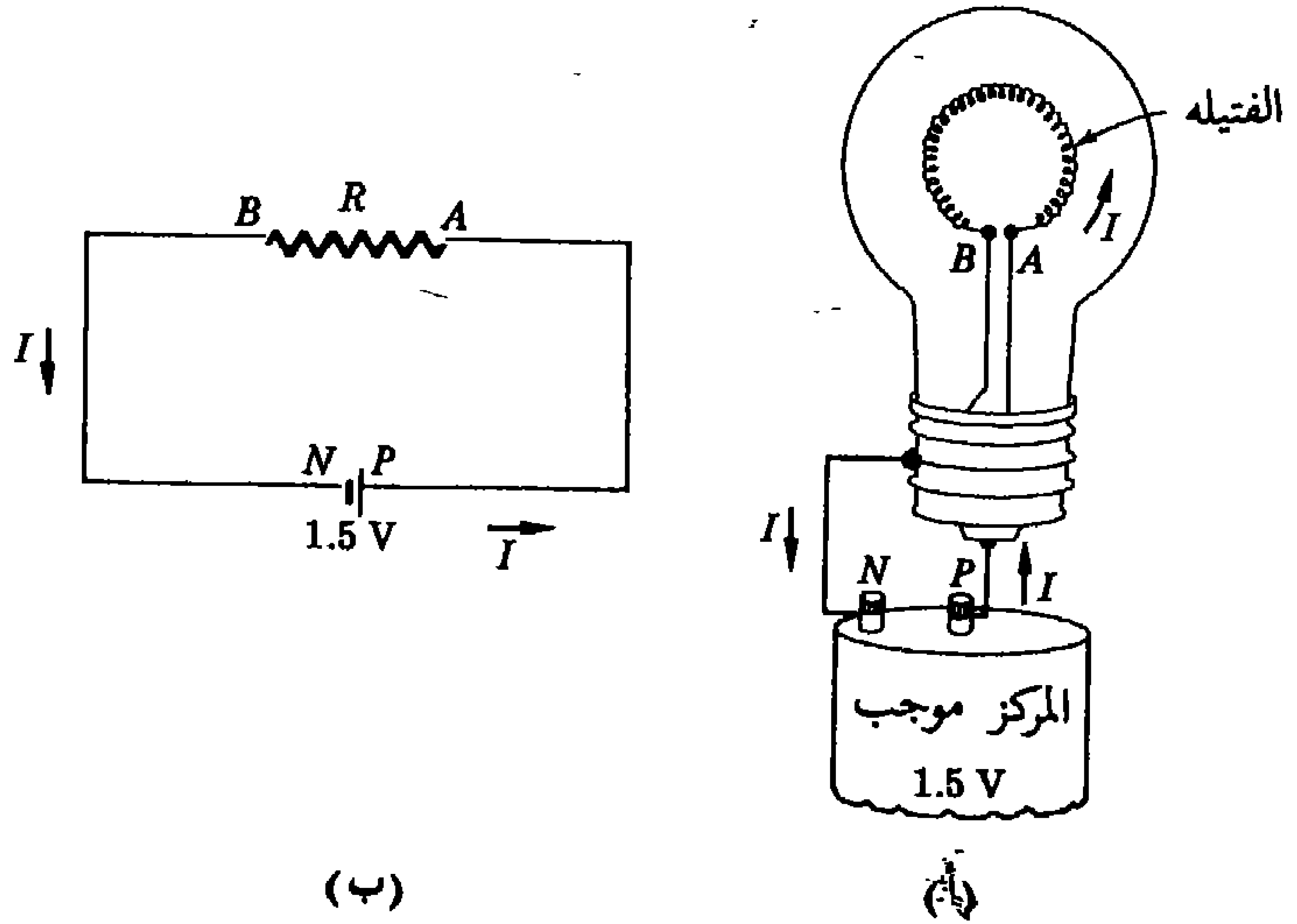
لالكترون او عدة الكترونات ، وعلى سبيل المثال يمكن لعداد « جيجر » او غرفة « ويلسون » السحابيه اكتشاف الكترونات منفردة . وسنناقش هذه الأدوات فى باب لاحق .

١٧ - ٥ دائرة كهربائية بسيطة

سنبدأ دراسة الدوائر الكهربائيه بفحص الدائرة البسيطة الموضحة فى الشكل ١٧ - ٦ حيث يرى مصباح صغير متصل ببطاريه . يسرى التيار من البطاريه خلال فتيلة المصباح ، ثم يعود الى البطارية . وعلى الرغم من أن هذا التيار يتكون من الكترونات تسرى خارجه من الطرف السالب N ، داخلة فى الطرف الموجب P للبطارية إلا أن اتجاه التيار سيكون عكس اتجاه سريان الالكترونات وهذا واضح من تعريفنا للتيار حيث أن اتجاه التيار قد عرف بدلاله الشحنات الموجبه وليس السالبه . وكما هو مدون على شكل فإن التيار I يسرى خارجا من الطرف الموجب P للبطارية ويعبر الفتيله من A الى B ثم يعود الى البطارية عند الطرف السالب N .

تتوهج فتيله المصباح حتى تبيض عندما يمر التيار ومن الواضح أن المصباح قد حصل على قدر من الطاقه من البطاريه ، فسريان الشحنات خلال الفتيله يولد حرارة حتى تصبح الفتيله ساخنه . الى درجة البياض .

وعلى ما يبدو فإن البطارية تعطى الشحنات طاقة تجعلها تسرى خلال الفتيله ، وعند سريانها تتولد الحراره بطريقة تشبه الى حد ما طريقه تولد الحرارة بالاحتكاك فى منظومة ميكانيكية .



شكل ١٧ - ٦
دائرة كهربائية بسيطه تتوهج فتيله المصباح عندما يمر خلالها تيار كهربائى فتصبح محماه لدرجة الابيضاض

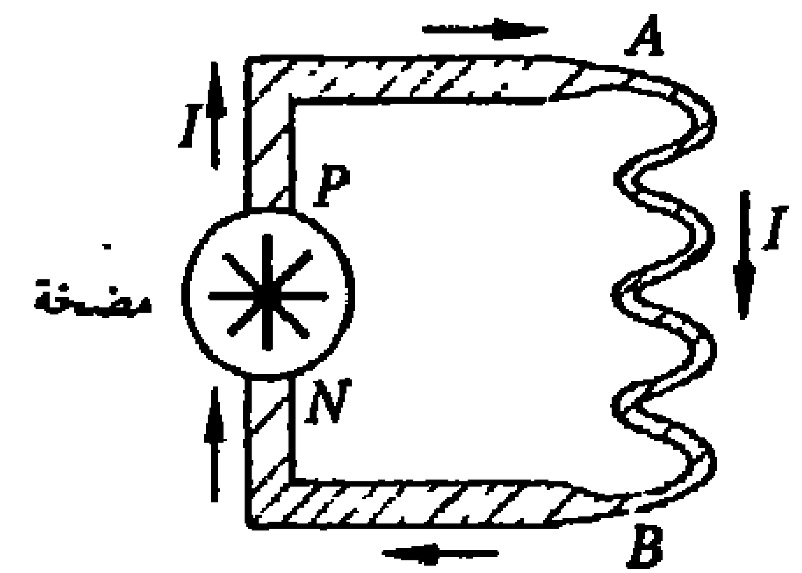
فى الدائرة التى فى شكل (١٧ – ٦أ) تصبح الفتيله بين النقطتين A و B فقط ساخنه ، أما التيار المار خلال الأسلاك الأخرى (أسلاك التوصيل من P الى A ومن B الى N) فيسبب تسخينا مهملا . ويرجع ذلك الى عاملين : (١) أن سلك الفتيله أدق بكثير عن الأسلاك الأخرى و (٢) أن مادة الفتيله ذات مقاومه عاليه لسريان الشحنات خلالها . وهذه المقاومه اكبر بكثير من المقاومه الكهربائيه للأسلاك الأخرى . تعتبر الطاقه الحرارية المتولدة فى أسلاك التوصيل مهمله فى كثير من الأغراض والتطبيقات وفى هذه الحاله يمكن اعتبار يمكن مقاومه أسلاك التوصيل مهمله .

الدائرة المرسومه فى شكل ١٧ – ٦أ ترسم عادة كما هو واضح فى الجزء (ب) اى

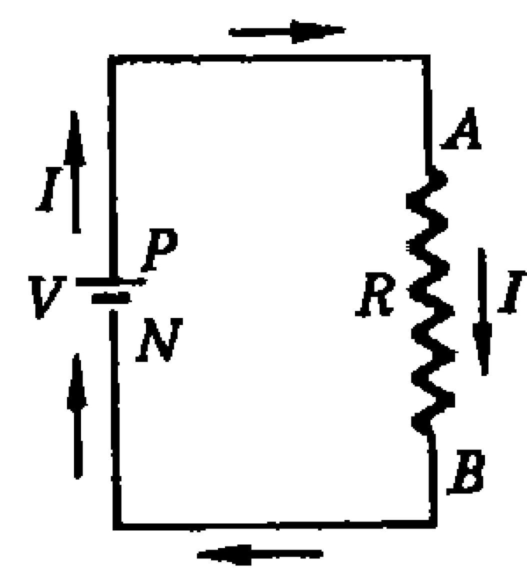
تعريف سلك يقوم فيه التيار بتوليد كمية محسوسه من الحرارة يسمى مقاوم وفى الحالة الراهنه تعتبر الفتيله بمثابه مقاوم . ويمكننا تمثيل انواع المقاومات بالرمز

رمز المقاومة ‏-\/\/\/-‏ (رمز المقاومة) وقد استخدام هذا الرمز فى الجزء (ب) لتمثيل الفتيله ، أما أسلاك التوصيل وهى فعليا عديمة المقاومة فإنها تمثل بخطوط مستقيمه تصل الى البطارية . ونلاحظ هنا ان التيار يسرى من الطرف الموجب للبطارية الى الطرف السالب .

يمكننا توضيح بعض ملامح الدائرة فى شكل ١٧ – ٦ إذا ماقارناها بنظام مائى مشابه . فإذا اعتبرنا ، على سبيل المثال . النظامين الموضحين فى الشكل ١٧ – ٧ فإننا نجد ان الجزء (أ) يتكون من مضخه تدفع الماء ليسرى خلال مجموعة من الأنابيب . وكل من المضخه والأنابيب مملوءه تماما بالماء . وعلى هذا ، فاذا دفعت المضخه قليلا من الماء فى الانبوبه عند P فإن كمية مساوية يجب أن تسرى لتعود الى المضخه عند N كما أن كمية مساوية من الماء يجب أن تسرى عبر النقطة A خلال الأنبوبه الضيقه . ومن الطبيعى أن نفس الكمية من الماء يجب أن تخرج من الأنبوبة الضيقه عند B . وكما نرى فإن كمية الماء التى تسرى عبر النقط A ، B ، N ، P فى كل ثانيه يجب أن تكون متساويه . ولما كانت كميه الماء التى تمر عبر نقطه ما كل ثانية هى التيار ، لذا كان التيار المائى I فى هذه الحالة متساويا فى جميع نقط الدائرة المائيه .



(أ)



(ب)

شكل ١٧ – ٧
النظام المائى فى (أ) يشبه النظام الكهربائى فى (ب) نلاحظ ان المضخه والبطاريه هما مصادرا الطاقه .

يمكننا تطبيق نفس الإعتبارات السابقه على الدائره الكهربائيه الموضحه فى الجزء (ب) فالأسلاك « ممتلئة » بالشحنات (الإلكترونات) وهى تقوم بدور جزيئات الماء فى الانابيب . بمعنى انها تمثل سائلا غير قابل للإنضغاط يسرى مثلما يسرى الماء فى انابيب الجزء (أ) . (تنعكس هذه الحقيقه فى مصطلحات العاملين بالكهرباء حين يتحدثون عن « العصير » الموجود فى الأسلاك) ويمكننا على الفور استنتاج أن التيار I فى الدائرة الكهربائية متساو فى جميع نقط هذه الدائرة البسيطة .

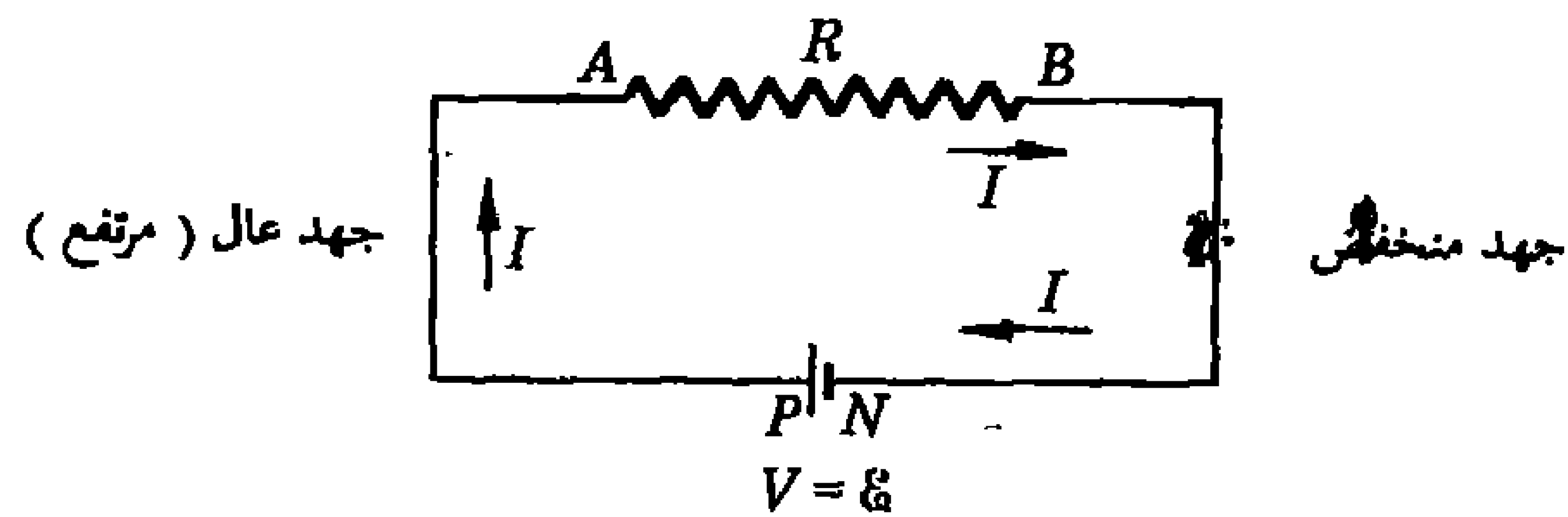
هناك نقطة هامة أخرى تجب ملاحظتها حول الدوائر فى شكل ١٧ – ٧ . قلنا أنه عندما تغادر كميه ضئيله من الماء المضخه عند P فإن كميه مساوية تدخل عند N وبالمثل فى الدائرة الكهربائية فإنه اذا سرت كميه ضئيلة من الشحنات خارجه من البطاريه عند P فان كميه مساويه تدخلها عند N. ويحدث هذا الامر لحظيا تقريبا . على أننا نلاحظ ان الشحنات التى تغادر P ليست هى نفس الشحنات التى تدخل عند N ولكن ما يحدث هو أن كل الشحنات داخل السلك تتحرك داخل السلك مسافه معينه . وان كميات متساويه تدخل وتغادر عند الطرفين .

من المفيد ان نفحص الطاقة فى كل من الدائرتين . هناك شغل يجب بذله فى الدائره المائيه لدفع الماء خلال الأنبوبه الدقيقه المتعرجه . وهذه الأنبوبة تشكل مقاومه كبيرة جدا لسريان الماء فى الانابيب الاكبر . ويمكننا على هذا تجاهل تأثيرات المقاومه الناتجة عن الأنابيب الكبيرة . والشغل المبذول فى دفع الماء خلال الأنبوبه الضيقه يفقد من خلال شغل لزوجى (او احتكاكى) وتنشأ عن هذا كميه من الحرارة فى أنبوبة المقاومة مساوية لكمية الشغل المفقود . وكما ترى فإن الطاقه التى أتاحتها المضخة للماء فقدت على هيئة شغل احتكاكى فى انبوبة المقاومة او أن الطاقة التى امدتها المضخة ظهرت على هيئة حرارة فى انبوبة المقاومة .

وموقف مشابه هو مايحدث فى الدائرة الكهربائية . تقوم البطارية بامداد الشحنات بالطاقة اللازمه لدفعها خلال اسلاك المقاومة . وتفقد هذه الطاقة لتظهر كميه من الحرارة عندما تمر الشحنات خلال المقاوم . وكما فى الدائرة المائية يتولد قدر مهمل – عادة – فى أجزاء الدائرة من P الى A ومن B الى N وهذه الاجزاء هى اسلاك التوصيل التى تشكل مقاومة مهملة لسريان الشحنات

١٧ – ٦ قانون أوم

لنفحص الآن هذه الدائرة البسيطة حتى نحصل على علاقة كميه تربط بين التيار ، وجهد البطاريه ومقاومة السلك . سنعيد رسم الدائرة فى شكل ١٧ – ٨ نلاحظ ان ذلك الجزء من الدائرة من P الى A قد ميز بتعبير « جهد عال » بينما الجزء من B الى N بتعبير « جهد منخفض » والسبب فى هذا كما يلى :



شكل ١٧ – ٨
يسرى التيار دائما من الجهد العالى الى الجهد المنخفض خلال مقاومة . القوة الدافعة الكهربائيه للبطاريه عديمة المقاومة هى ع

اعتبر ان هناك شحنه موجبة فى نقطه P من الدائرة وهى بهذا عند نفس الجهد الذى للطرف الموجب للبطارية . وهو V volts (فولت) فوق جهد النقطة N . عندما تتحرك الشحنة عبر السلك عديم المقاومة من P الى A فإنها لا تفقد أى قدر من طاقتها لأن الطاقة الحرارية المتولده فى هذا السلك مهملة ، وعليه فإنها حين تصل الى النقطه A تكون عند نفس الجهد الذى للنقطه P أى أن جزء الدائره كله من P الى A يقع عند نفس قيمة الجهد أو أن هذا الجزء موجود عند نفس المستوى الكهربائى .

على أن النقطه N تقع عند جهد يقل بمقدار V volts (فولت) عن جهد النقطه P وحيث أن جزء الدائره من N/الى B عند نفس المستوى الكهربائى فإننا نستنتج أن جهد هذا الجزء بأكمله يقل بمقدار V Volts (فولت) . ولما كانت الشحنات الموجبه تتحرك من نقط ذات جهد مرتفع الى نقط ذات جهد منخفض فإنه ليس من المدهش أن التيار (وهو سريان الشحنات الموجبه) يتجه من A الى B وبالفعل فإن : التيار يسرى دائما خلال مقاوم ما من طرفه ذى الجهد المرتفع الى الطرف الآخر ذى الجهد المنخفض .

لقد أصبح لدينا الآن ما يكفى من الخبره لتقبل حقيقه هامة اكتشفها اول مرة جورج سيمون اوم (١٧٨٧ – ١٨٥٤) (Georg Simon Ohm (1787-1854 . لقد وجد بالتجربه ان التيار المار فى مقاوم ما يتناسب طرديا مع فرق الجهد بين طرفيه . وعلى سبيل المثال ، ففى شكل ١٧ – ٨ وجد ان .

حيث V هو فرق الجهد بين طرفى المقاوم ، واذا ماضوعف جهد البطاريه فإن التيار أيضا يتضاعف .

$$I \propto V$$

تعريف

والعامل الآخر الذى يؤثر فى التيار هو قيمة المقاومه لهذا المقاوم ونحن نطلق على هذا التأثير **المقاومة** R للمقاوم . وتعرف **المقاومة** R على النحو التالى : اذا سبب فرق للجهد V عبر مقاوم ما تيارا قيمته I فإن مقاومة المقاوم تكون :

$$R = \frac{V}{I}$$

ووحدة المقاومة هى فولت لكل أمبير ويرمز لها بالرمز أوم (Ω) Ohm . والمعادلة المستخدمة للتعريف تكتب احيانا على الصورة

قانون أوم

$$V = IR \qquad (١٧ - ٢)$$

وتسمى **قانون أوم** Ohm'slow على أن Ohm أوم افترض ان R لاتتغير بتغيرفرق الجهد عبر المقاوم وهذا صحيح فى أغلب الأحوال ولكن ليس دائما كما سنرى فيما بعد . وعلى الرغم من أى شيء فإن المعادلة (١٧ — ٢) صحيحه دائما اذا ماعتبرنا أن R معرفه بها .

مثال توضيحى (١٧ — ٤) : اذا كان المصباح الكهربائى فى الشكل ١٧ — ٦ يسحب تيارا قدره 0.25A حينما يتصل عبر بطارية قيمتها 1.5V فكم تكون مقاومة المصباح تحت هذه الظروف ؟

طريقة الحل : سنستعين مباشرة بقانون أوم (معادلة ١٧ — ٢) . إذا كان فرق الجهد عبر المصباح هو $V = 1.5V$ وكان التيار $I = 0.25$ فإن

$$V = IR$$

تصبح

$$R = \frac{1.5\ \text{V}}{0.25\ \text{A}} = 6.0\,\Omega$$

اى ان مقاومة المصباح الساخن هى $6\,\Omega$ وسنرى فيما بعد أن مقاومة المصباح تكون أقل بكثير حين لا يكون على هذه الدرجة من السخونة .

١٧ — ٧ وضع أجهزة القياس فى الدائرة

لقد أشرنا فيما سبق الى أن اسلاك التوصيل فى دائرة ما لها مقاومه منخفضة فعلى سبيل المثال تبلغ مقاومة سلك منزلى عادى قيمة $10^{-3}\,\Omega$ لكل متر طولى وهذه المقاومة مهمله كما سنرى .

عندما نرسم دائرة كهربائيه نرمز للمقاومه فيها بالرمز ⁓ۥ⁓ كما وضحنا سلفا . ان كل الأسلاك فى الدائرة ١٧ — ٦ ، ١٧ — ٨ تعتبر قيمتها مهمله فيما عدا تلك المميزة بهذا الرمز وعليه فلا يمكن لأى فرق للجهد ان يوجد عبر سلك لا مقاومة له ، وذلك لأن قانون أوم قد نص على أن

$$V = IR$$

فاذا كانت $R = 0$ فإن V ايضا يجب أن تساوى صفرا .

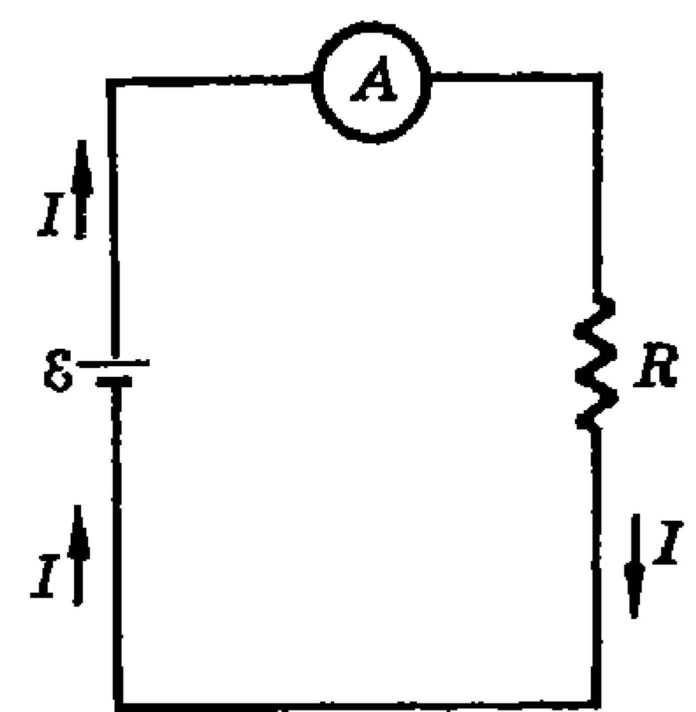
وكثيرا مايود الإنسان ان يقيس التيار الذى يسرى فى سلك ما ولذا فهو يستعمل الأميتر *ammeter* .وعمل هذا الجهاز من داخله سيناقش فى الفصل العشرين وسنكتفى حاليا بالقول انه يسجل كميه الشحنه التى تمر خلاله فى الثانية الواحدة او التيار مثلما يفعل عداد استهلاك المياه .

الغرض من الأميتر

فى شكل ١٧ – ٩ يسرى نفس التيار فى جميع اجزاء الدائرة . (ولإيضاح هذا ، اعتبر خطا من انابيب المياه ، فلو لم يكن هناك تسرب من أى نوع ، فإن نفس كمية الماء يجب أن تسرى خلال كل انبوبه) . وعلى هذا فالأميتر الموجود فى الدائرة بالطريقة الموضحة فى شكل (١٧ – ٩) سيسجل التيار المار فى أى سلك من الدائرة ، وتلاحظ أن كل التيار يسرى خلال الأميتر ويقال هنا أنه متصل **على التوالى** مع الدائرة .

الغرض من الفولتميتر

يلزمنا من وقت لآخر ان نقيس فرق الجهد بين نقطتين .. ولذا نلجأ لاستخدام الفولتميتر . إذا أردنا أن نقيس فرق الجهد بين طرفى المقاوم فى الشكل ١٧ – ٩ (او ما يسمى **بهبوط الجهد** عبر المقاوم) فإننا نوصل الفولتيمتر كما هو موضح فى الشكل ١٧ – ١٠ . وعلينا أن نقارن هذا الشكل بالشكل السابق ١٧ –٩ بعناية . الفولتميتر المثالى يجب ان تكون مقاومته لانهائيه حتى لا يمر بداخله أى تيار فيؤدى ذلك الى الإخلال بالدائرة المتصل فيها كما فى الشكل ١٧ – ١٠ .

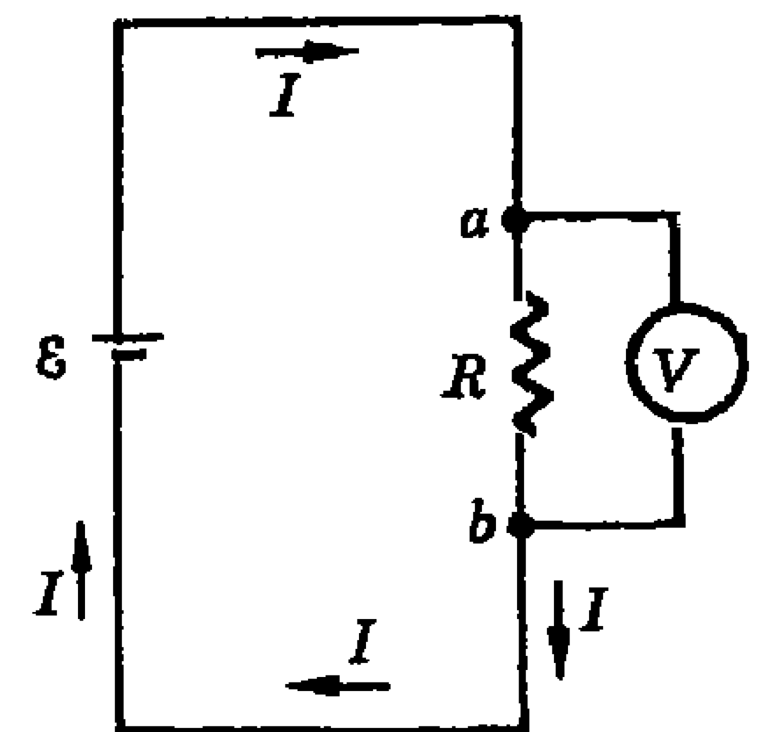


شكل ١٧ – ٩
يتصل الأميتر على التوالى مع المنبع لقياس التيار المار خلال السلك ويجب ان تكون مقاومة الأميتر منخفضه جدا . لماذا ؟

ومن ناحية أخرى فان الأميتر المثالى يجب أن تكون مقاومته صفرا حتى لا تختل الدائره حينما توصل كما فى شكل ١٧ – ٩ . وهناك خطأ سيىء يقع فيه بعض الطلاب أحيانا عندما يوصلون الأميتر بإهمال مكان الفولتيمتر فى شكل ١٧ – ١٠ وحيث ان فرق الجهد بين النقطتين a و b هو ε ، فإن التيار خلال الأميتر يصبح :* .

$$I = \frac{V}{R_{\mathrm{am}}} = \frac{\varepsilon}{0} \to \infty$$

وبذا يتلف الأميتر . ويتحطم . ولما كانت مقاومة الأميتر ضئيلة للغايه لذا فهو غير قادر . على أن يحد من التيار المار خلاله – وهذا التيار من الكبر بحيث يقوم بتسخين الأسلاك داخل الأميتر لدرجة تجعل الجهاز يحترق .



شكل ١٧ – ١٠ . لقياس فرق الجهد بين a و b فاننا نوصل الفولتميتر كما هو موضح والفولتميتر يجب أن تكون مقاومته كبيرة جدا . لماذا ؟

١٧ – ٨ المقاومية واعتمادها على درجة الحرارة

ليست كل المواد موصلات جيدة للكهرباء ، بل أن هناك فرقا بين قدرة المعادن المختلفة على توصيل التيار . ولذا فنحن فى احتياج الى كمية محددة تخبرنا بدقة عن مدى جودة المادة كموصل للتيار أو أن نتمكن – إذا أردنا – من أن نصف مادة ما بكبر مقاومتها وسنستخدم فى الواقع هذه الطريقة الأخيرة فيما يلى :

افترض ان لدينا قطعة اسطوانيه الشكل من سلك ما كما فى الشكل (١٧ – ١١) . مقاومة هذا الجزء وطوله (L) تعتمد على طول السلك ومساحة مقطعة .

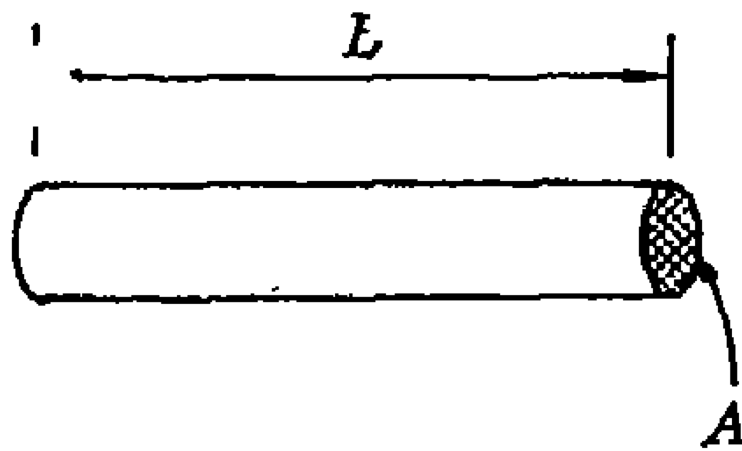
وحيث أن سلكا له ضعف الطول يتوقع أن تكون له ضعف المقاومة ، لذا فالمقاومة تتناسب طرديا مع L بالإضافة الى هذا ، كلما زادت مساحة المقطع A ، قلت المقاومة . وعليه فالمقاومة R تتناسب عكسيا مع A . واذا عبرنا عن هذا بمعادلة فان :

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (١٧ - ٣)$$

المقاومية

وثابت التناسب هنا هو ρ (الحرف الاغريقى « رو ») هو خاصية للمادة التى صنع السلك منها . تسمى هذه الخاصية **مقاومية** المادة . فإذا ماكانت كبيرة ، فإن المادة تكون موصلا رديئا . والآن اذا حللنا المعادلة سعيا وراء ρ فإن :

$$\rho = R \frac{A}{L}$$



شكل ١٧ - ١١
تتناسب مقاومة سلك منتظم تناسبا طرديا مع طوله L وعكسيا مع مساحة مقطعة A .

وتكون وحداتها هى ohm - meters أو حاصل ضرب الأوم فى وحدات الطول . يحتوى الجدول ١٧ - ١ على مقاوميات المواد المختلفة ونلاحظ أن النحاس والفضة هما أفضل الموصلات المذكورة ومن هنا يتضح سبب صنع معظم الأسلاك من النحاس .

قد تستخدم أحيانا كمية أخرى تسمى **الموصلية** لوصف الخواص الكهربائية للمعادن والموصلات الأخرى وهذه الكمية تكافىء $1/\rho$ ، أى أنها تمثل مقلوب المقاومية .

جدول ١٧ - ١
المقاوميات ومعاملاتها مع درجات الحرارة

المادة	المقاومية ρ AT 20°C, Ωm	α AT 20°C, $°C^{-1}$
فضه	1.6×10^{-8}	4.1×10^{-3}
نحاس	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
الومينوم	2.8×10^{-8}	4.0×10^{-3}
تنجستن	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
حديد	10×10^{-8}	6.5×10^{-3}
جرافيت (كربون)	3500×10^{-8}	-0.5×10^{-3}

سنلاحظ أن المقاومية المذكورة فى الجدول (١٧ - ١) عند درجة حرارة معينه وهى ٢٠ م (20°C) . وسبب هذا هو أن مقاومة الأسلاك تتغير بشكل ملحوظ مع درجة الحرارة . على انه فى مدى محدود من درجات الحرارة ، يمكن تمثيل المقاومية بمعادلة على النحو التالى :

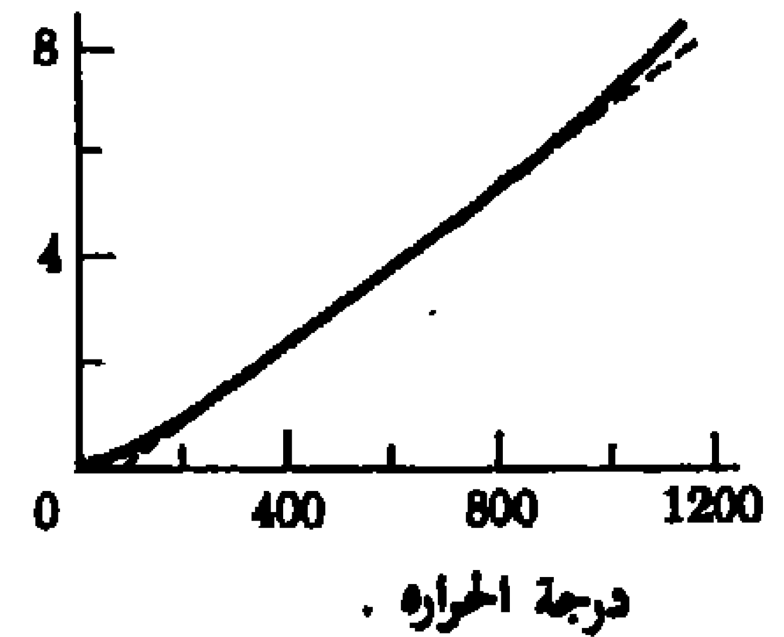
$$\frac{\rho - \rho_{20}}{\rho_{20}} = \alpha_{20}(t - 20°)$$

أو

$$\frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha_{20}(t - 20°)$$

حيث t هى درجة الحرارة المئوية .

فى كلتا المعادلتين تستعمل قيم المقاومية (والمقاومة) عند 20°C ρ_{20} (R_{20}) وذلك كقيم مرجعية . وخارج القسمة المعطى فى كل حالة يمثل التغير الكسرى فى المقاومية (أو المقاومة) ومعامل درجة الحرارة للمقاومة α يعتبر مقياسًا لمدى تغير المقاومة مع درجة الحرارة ، فاذا كانت α صفرا فان المقاومة تكون ثابته . ويوضح الجدول (١٧ - ١) بعض القيم النموذجية للمقدار α .



شكل ١٧ - ١٢
المقاومية الفعلية للنحاس موضحة على الرسم بمنحنى مستمر اما الخط المستقيم فممثل بخط منقطع

من الواضح أن قيمة α المستخدمة فى المعادلة (١٧ - ٤) يجب أن تقاس عند درجة الحرارة التى اتخذت مرجعا لقياس المقاومة . وفى بعض الأحيان تستخدم درجات حرارة أخرى (غير ٢٠ م) كمراجع وهنا يجب أن تتغير المعادلة (١٧ - ٤) بالتبعية . يوضح الشكل ١٧ - ١٢ كيفية تغير مقاومية النحاس مع درجة الحرارة . ويلاحظ هنا أن التغيرات التى تطرأ على المقاومة مع درجة الحرارة هى فعلا كبيرة جدا .

ولو أن معادلة مثل المعادلة (١٧ - ٤) كانت صحيحة تماما لتغير الرسم الموجود فى الشكل (١٧ - ١٢) ولأصبح خطا مستقيما . وفى الواقع فالرسم ذو انحناء بسيط وعليه فالمعادلة (١٧ - ٤) صحيحة بشكل تقريبى فقط اذا مااعتبرنا فترات أطول من درجات الحرارة .

مثال توضيحى ١٧ - ٥ : قضيب من الحديد على هيئة متوازى مستطيلات ومساحة مقطعه 2×2cm وطوله 40 cm . كم تبلغ مقاومته ؟

طريقة الحل : نعرف أن

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (١٧ - و)$$

من الجدول (١٧ - ١) نجد أن : $P = 1.0 \times 10^{-7}$ .m ولذلك :

$$R = (1 \times 10^{-7}) \left[\frac{0.40}{(0.02)(0.02)}\right] = 1 \times 10^{-4}\,\Omega \quad (١٧ - ز)$$ عند درجة 20°

فى هذه المعادلة يجب وضع الأبعاد الصحيحة لتحقيق الاجابة بالوحدات المعطاة .

مثال توضيحى ١٧ – ٦ عند درجة الحرارة 520°C ، ماهى مقاومة القضيب الذى ذكر فى المثال السابق ؟

طريقة الحل : باستعمال البيانات المدرجة فى الجدول (١٧ – ١) وكذا نتائج المثال السابق فان :

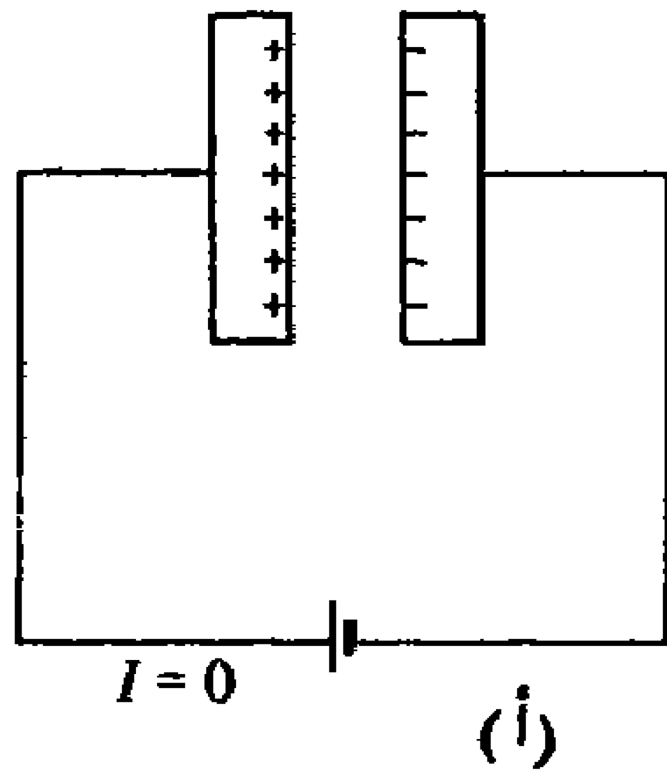
$$\frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha_{20}(t - 20) \qquad (\text{١٧} - \text{ح})$$

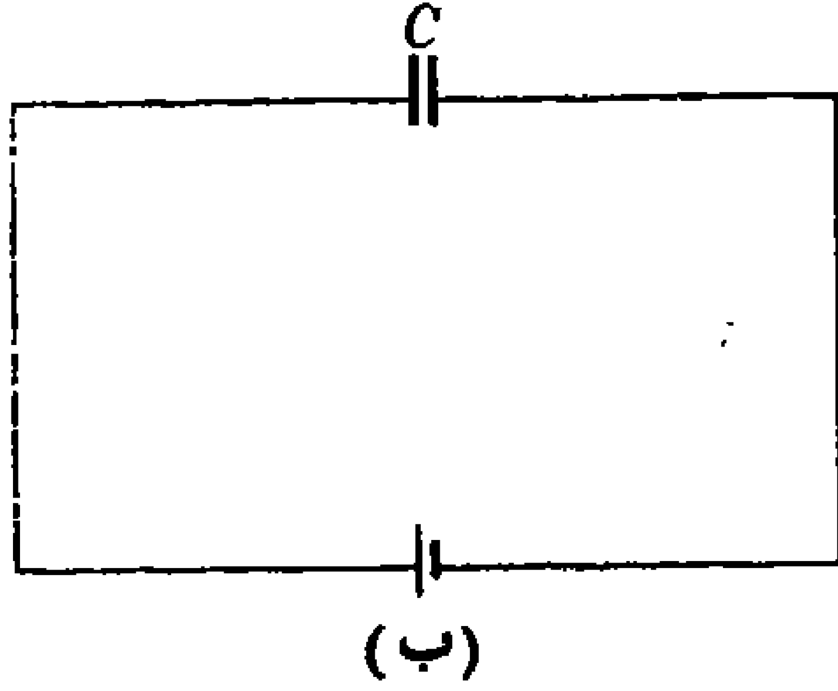
$$\frac{R - 1 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-4}} = (6.5 \times 10^{-3})(520 - 20) \qquad (\text{١٧} - \text{ط})$$

ومنها

$$R = 4.3 \times 10^{-4}\,\Omega \qquad (\text{١٧} - \text{ى})$$

أى أن مقاومة القضيب عند هذه الدرجة تبلغ ٤٫٣ مرة أكبر عن القيمة عند 20°C





شكل ١٧ – ١٣ الشحنـــات المتساويـــة والمتضادة تتكون على الأوجه الداخلية لألواح المكثف وتلاحظ الرمز المستعمل للتعبير عن المكثف فى (ب)

١٧ – ٩ المكثفات

يتكون أبسط أنواع المكثفات من لوحين معدنيين متوازيين . ويوضح الشكل (١٧ – ١٣) كيف يتصل مثل هذا المكثف ببطاريه ، حيث يقوم الطرف الموجب للبطارية بوضع شحنات موجبه على أحد الألواح بينما يشحن الطرف السالب اللوح الآخر بشحنة سالبة . تقوم هذه الشحنات بجذب بعضها البعض ولذا فهى تستقر على الأسطح الداخلية للألواح ، كما هو موضح . والمكثف بهذا التركيب هو أداة قادرة على تخزين الشحنات . وكما يبين الشكل فى الجزء (b) فإن الرمز المستعمل للمكثف هو —||— او أحيانا —|(—

رمز المكثف

إن مايعنينا الآن هو كم من الشحنة Q يستقر على أحد الألواح وليكن الموجب . (من الطبيعى أن شحنه سالبه مساوية للموجبه توجد على اللوح السالب نظراً لكون المجموعه متعادلة كهربائيا) . تعتمد كمية الشحنة على اللوح على عدد من العوامل . اولا ، كلما زاد جهد البطارية زادت الشحنات التى يمكن أن تضعها على المكثف . وعليه فإذا كان V هو فرق الجهد عبر المكثف فإن :

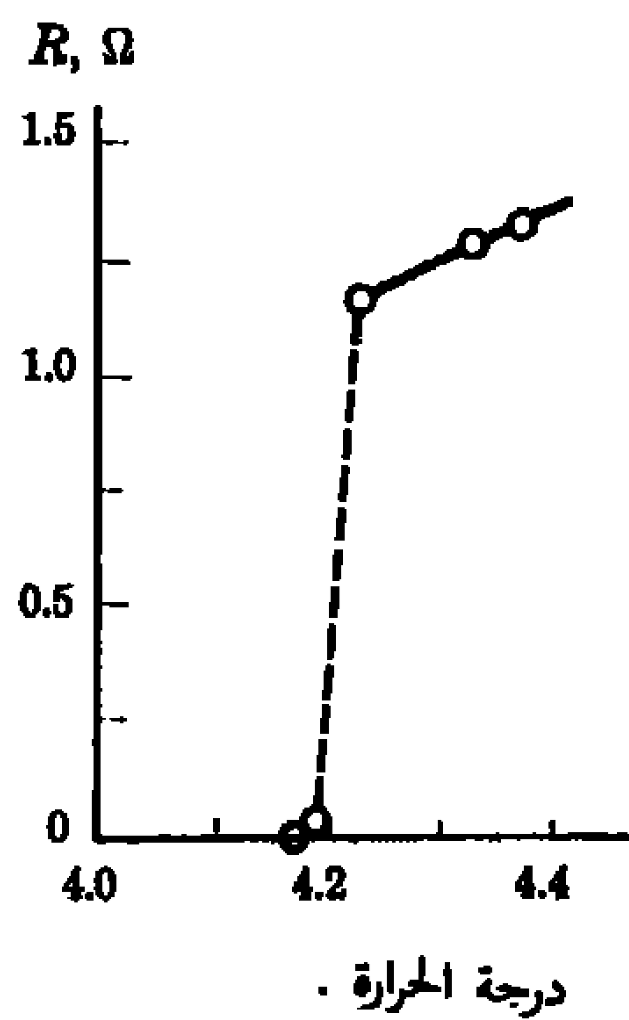
$$Q \propto V$$

مفرطات الموصلية

من المعروف ان الموصلات العادية للكهرباء تصبح اجود توصيلا كلما انخفضت درجة الحرارة ، وقد عرفت هذه الحقيقه منذ 1835 من القياسات التى قام بها هاينرش لنز Heinrich Lenz وفيما تلا ذلك من سنوات كان هناك تخمين بأن مقاومة المعادن قد تصل فعليا الى الصفر عند الصفر المطلق ، أى عند ‎-273°C‎ أو ‎O°K‎ . على انه لم يستطع احد أن يجرى تجربة لقياس المقاومة عند درجات الحرارة المنخفضة جدا الا بعد فترة طويلة جدا حيث أن الوسائل المتاحة للتبريد لم تكن تكفى .

وقد لقيت ابحاث الوصول لدرجات حرارة منخفضة جدا دفعة قويه فى عام ١٨٨٣ حين تمكن فروبلوفكسى واولزفسكى Wroblewski, Olzewski من إسالة الهواء وحين استخدم الهواء السائل كعامل مساعد أصبح من الممكن اجراء تجارب عند درجة غليان الاكسجين (‎-183°C‎) وعند درجة غليان النتروجين (‎-196°C‎) . وتمكن جيمس ديوار James Dewor عقب ذلك مباشرة فى ١٨٩٨ (1898) من إساله غاز الايدروجين وهو يغلى عند (‎-263°C‎) أو ‎10°K‎ وبقى غاز واحد استعصى على الإسالة وهو غاز الهليوم . وقد امكن اسالته فى ١٩٠٨ بواسطة هايك كامرلنج أونيس HeiKe Kamerlingh Onnes (١٨٥٣ – ١٩٢٦) ، ووجد أن سائل الهليوم يغلى عند 4.2k .

وقد استطاع أونيس باستخدام الهليوم السائل الوصول الى درجات حرارة منخفضه لم يمكن من قبل الوصول اليها ، ومن ثم استطاع قياس مقاومة المعادن عند درجات حرارة منخفضه جدا . وتقنية القياسات كانت بسيطة للغاية من حيث المبدأ ، بينما كانت صعبه من الناحية العملية بسبب صعوبة تثبيت درجات الحرارة لما كانت المقاومة R قد عرفت بقانون أوم ، فكان على « أونيس » ان يقيس فرق الجهد V عبر أسطوانة معينه من المعدن عندما يمر بها تيار محدد قيمته I وتكون $R=V/I$. وقد استخدم الزئبق فى هذه القياسات على أنه المعدن المطلوب (يتجمد الزئبق عند ‎-39°C‎ ولذا فهو من الجوامد) . عندما اجريت التجربة المطلوبة عام ١٩١١ ، حصل « أونيس » على النتائج المذهلة ، والموضحة فى الشكل .



نتائج هـ كامير لنج اونيس (١٩١١) لمقاومه الزئبق عند درجة حرارة قرب 4°k كانت المقاومـة عنـد (273°C) تقريبا ، حوالى 60 Ω .

على الرغم من ان المعدن اخذ يقترب بالتدريج من مقاومة منخفضه جدا كلما انخفضت درجة الحرارة ، إلا انه عند 4.2°K تضاءلت المقاومه فجأة الى الصفر وأصبح الزئبق مانشير اليه اليوم بأنه **مفرط الموصليه** . وقد أشارت التجارب المتتالية الى ان التيار يمكن أن يسرى الى الأبد فى حلقة من مادة مفرطة الموصلية حتى لو كان مصدر القوة الدافعة الكهربية غير موجود ، والى المدى الذى يمكن للتجربة العملية ان تؤكده فإن مقاومة مفرط الموصليه هى بالضرورة صفر .

ونجح كاميرلنج اونيس فيما بعد فى بيان أن الرصاص ، والقصدير والانديوم هى ايضا تصبح مفرطة الموصلية عند الدرجات 7.2K ، 3.7K ، 3.4K على الترتيب . ومنذ ذلك الحين ، اكتشف العديد من مفرطات الموصلية . واكثر الامور أهمية هو أن بعض السبائك تصبح مفرطة الموصلية عند درجات حرارة مرتفعة نسبيا ، وعلى سبيل المثال ، فالمركب Nb_3Sn يصبح مفرطا فى الموصلية عند 17.9K . نلاحظ ان الحرارة لاتتولد عندما يمر تيار كهربائى فى معدن مقاومته صفر ، لذا نستخدم الآن مفرطات الموصلية حين تشكل هذه الخاصية أهمية عظمى ، على سبيل المثال فى صنع المغناطيسات الكهربائية الضخمة . إن الأسباب النظرية لظاهرة فرط الموصلية فى ضوء التركيب الذرى لم تتضح إلا حديثا ، وخاصة بعد 1950 وعلى الرغم من ذلك فإن فهمنا لهذه الظاهرة لايزال بعيدا عن الكمال .

ومن الطبيعى أنه كلما كبرت مساحة الألواح ، كلما زادت الشحنة عليها . وبالإضافة الى ذلك كلما اقتربت الالواح من بعضها البعض ، فان اللوح الموجب سيقوم بجذب المزيد من الشحنات السالبة من البطارية نحو اللوح السالب وتتعلق كل هذه العوامل بالتفاصيل التركيبية والهندسية للاداة وتصبح ثوابت خاصة بها ويمكننا على هذا أن نكتب :

الشحنة على المكثف

$$Q = CV$$

حيث C مقدار ثابت لمكثف معين . ويسمى هذا الثابت سعة المكثف عندما تكون السعة كبيرة فإن الشحنات على المكثف تكون كبيرة عند فرق جهد معين بين طرفيه .. لما كانت الشحنة Q تقاس بالكولوم Coulomb وفرق الجهد V بالفولت volt فان وحدات السعة تصبح كولوم لكل فولت Coulomb/Volt وهذه الوحدة تسمى فاراد Farad (F) .

واذا كانت أحد اللوحين هى A وكانت المسافة بين اللوحين d

فمن الممكن اثبات أن سعة مكثف متوازى اللوحين تعطى بالمعادلة :

مكثف متوازى اللوحين

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad \text{للألواح المتوازية} \qquad (١٧ - ٦)$$

حيث ε_0 (ابسيلون) هى المجاوزية فى الفراغ الحر وتساوى 8.85×10^{-12} F/m (الثابت ε_0 هو مقلوب 4π. مضروبة فى الثابت k فى قانون كولوم) . كمثال على ماسبق افترض أن اللوحين على شكل مربع طول ضلعه 10cm وأن المسافة بين اللوحين . هى 0.10 mm واذا عبرنا عن وحدات الطول بالأمتار وعوضنا فى المعادلة ١٧ - ٦ فإن السعة تكون

$$C = 8.85 \times 10^{-10}\ \text{F} = 8.85 \times 10^{-4}\ \mu\text{F} \qquad (\text{١٧ - ك})$$

حيث $1\ \mu F$ يساوى $10^{-6} F$ وتستخدم هذه الوحدة لقياس السعات حيث أن قيمها تقع عادة فى مدى $1\ \mu F$ أو أقل . على أن المعادلات (١٧ – ٥) و (١٧ – ٦) لابد وأن يستخدم فيها الفاراد F .

من الناحية العملية تحتوى معظم المكثفات ذات الألواح المتوازية على صفحة عازلة من مادة تسمى عازل توضع بين اللوحين . ومرد هذا الى أمرين . أولهما أن الألواح المعدنية يمكن بهذا جعلهما على درجة عالية من القرب بدون أن يتماسا أو يسمحا للشحنات أن تسرى . وكثير من المكثفات المتداولة تجاريا تتركب من صفيحتين معدنيتين رقيقتين وبينهما غشاء رقيق من البلاستيك ليحفظهما من التماس . وبتكرار هذه العملية تتكون طبقات من الصفائح المعدنية التى يفصل بين كل اثنين منها طبقة عازلة ، ثم تطوى هذه الصفائح مكونة اسطوانة محكمة تغلف بطريقة ملائمة . وتصبح الأداة فى النهاية عبارة عن مكثف متوازى اللوحين على الرغم من أنها تبدو مختلفة تماما عن الأداة المرسومة فى الشكل ١٧ – ١٣ . ومكثف قيمته $1\ \mu F$ وذو حجم عادى يشغل عادة حوالى $1\ cm^3$ حين يصنع بالطريقة المشروحة آنفا .

جدول ١٧ – ٢
ثابت العزل عند

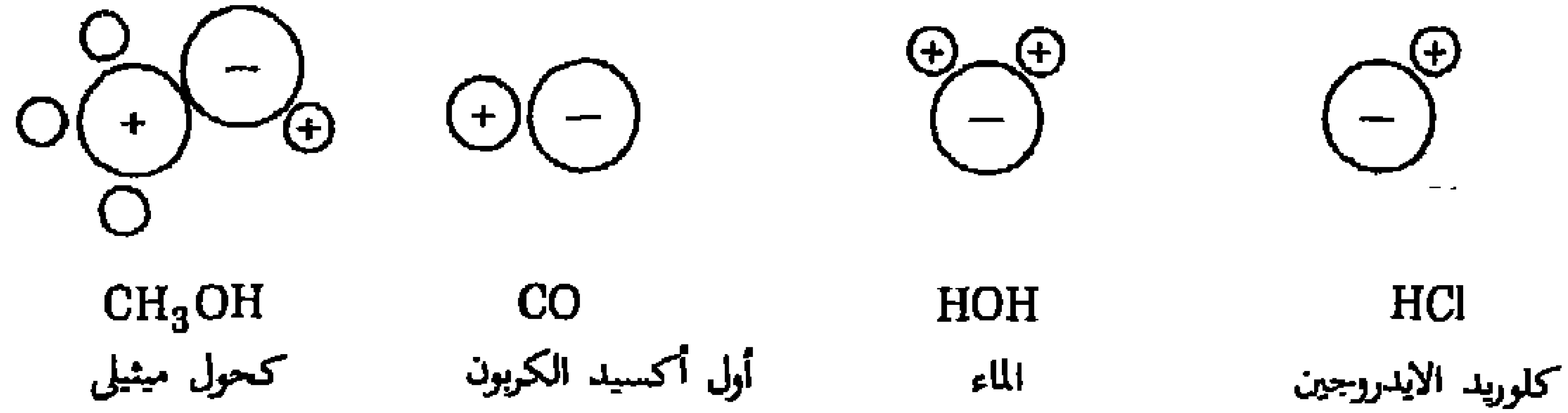
هواء	1.006	الثلج (-5°C)	2.9
بارافين	2.1	ميكا	6
زيت البترول	2.2	أسيتون	27
بنزين	2.29	كحول ميثيلى	31
بوليستيرين	2.6	ماء	81

للعوازل قوة عزلية مرتفعة بمعنى أن الشرارة لاتحدث فيها بسهولة كما تحدث فى الهواء .ولهذا السبب فإن الألواح المتوازية وبينها عازل يمكن أن تستخدم عند فروق للجهد أعلى من المكثفات الهوائية . اذا كان لدينا مكثف به فراغ (أو هواء بتقريب جيد) بين ألواحه فإن سعته ستعطى بالمعادلة (١٧ – ٦) . أما إذا وضع عازل بين الألواح فإن السعة ستكون أكبر بمعامل قيمته k_a (أى k_a مرة) وهو **ثابت العزل** أو **المجاوزيه النسبية** للعازل . ويبين جدول (١٧ – ٢) بعض القيم النموذجية لثوابت العزل . وسنناقش العوازل بتفصيل أكبر فى القسم التالى . ثابت العزل

١٧ - ١٠ العوازل

تزداد السعة الكهربية لمكثف متوازى اللوحين إذا وضعت مادة عازلة (عازل) بين اللوحين كما سبق التنويه فى القسم السابق . وهذه ذات أهمية فى مجالات الفيزياء الحيوية والكيميائية وكذا فى المجالات التقنية البحته . فالتغيرات الحادثة فى السعة نتيجة لوضع مادة معينة يمكن أن يستدل منها على السلوك الجزيئى للمادة نفسها ولنحاول أن ن تتوغل فى بحث هذه النقطة .

كثير من الجزيئات لاتكون شحناتها موزعة توزيعا منتظما . وعلى الرغم من كون الجزىء كوحدة متكاملة متعادل ، إلا أن الذرات المختلفة بداخله يمكن أن تكون قد فقدت (ولو جزئيا) الكترونا لتكتسبه ذرات أخرى فى نفس الجزىء . يوضح الشكل (١٧ - ١٤) تخطيطا لبعض الأمثلة النموذجية . والجزيئات من هذا النوع تسمى جزيئات ثنائية الأستقطاب حيث أن ثنائى الاستقطاب حسب التعريف عبارة عن شحنتين متساويتين ومتضادتين تفصلهما مسافة صغيرة جدا . أما مايسمى **بعزم ثنائى الاستقطاب** μ لمثل هذا الجزىء فيساوى مقدار احدى الشحنتين مضروبا فى المسافة التى تفصلهما . أو $\mu = Qd$



شكل ١٧ - ١٤
أمثلة لجزيئات ثنائية الاستقطاب

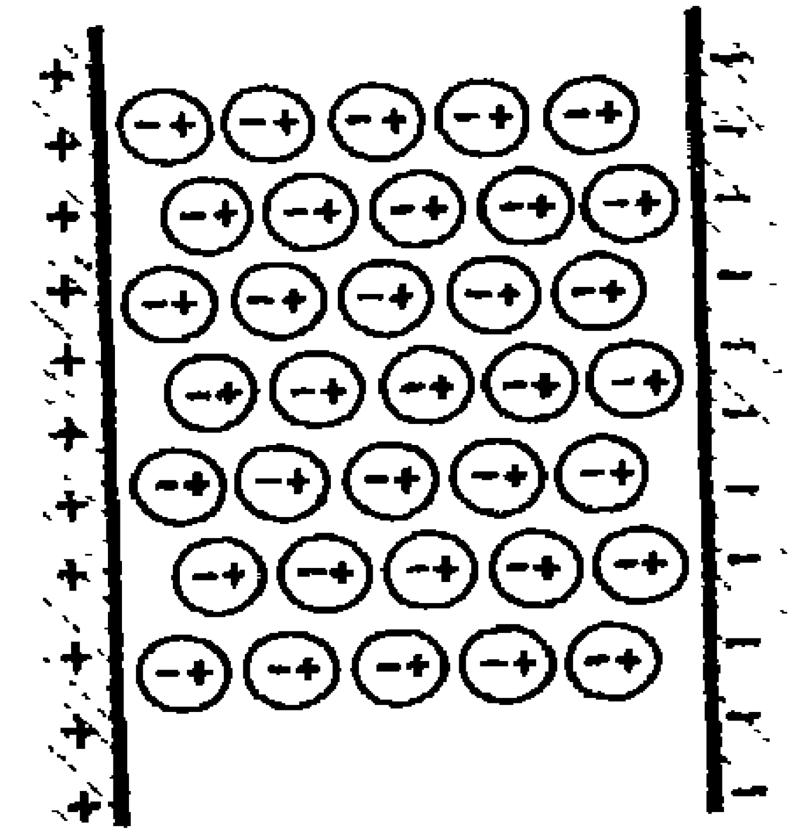
تبلغ قيمة عزم ثنائى الاستقطاب لجزىء نموذجى حوالى* 1 D(Debye) أو مايكافىء $1/3 \times 10^{-29}$cm فمثلا ، اذا كانت الشحنة المنفردة فى جزىء HCl فى شكل (١٧ - ١٤) هى شحنة الإلكترون 1.6×10^{-19}C وكان عزم ثنائى الاستقطاب لهذا الجزىء هو 1.03D فإن

$$(1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})(d) = (1.03)(\tfrac{1}{3} \times 10^{-29})\ \mathrm{C \cdot m}$$

حيث d . هى المسافة بين الشحنات وتساوى $d \approx 0.5\times10^{-10}$m فى كثير من الحالات تكون قيمة d أقل من المسافة المعروفة بين الذرات والسبب فى هذا يرجع الى التقسيم غير المتكافىء للشحنات بين الذرات . والقيمة التى أوجدناها للكمية d لجزىء HCl ليست إلا نصف القيمة المعروفة للمسافة بين مراكز الذرات .

---

*تكريما للعالم الفيزيائى الكيميائى الشهير ب . دباى P .Debye الذى نال جائزة نوبل فى الكيمياء عام ١٩٣٦ لقاء أبحاثه فى الجزيئات وأشعة اكس .



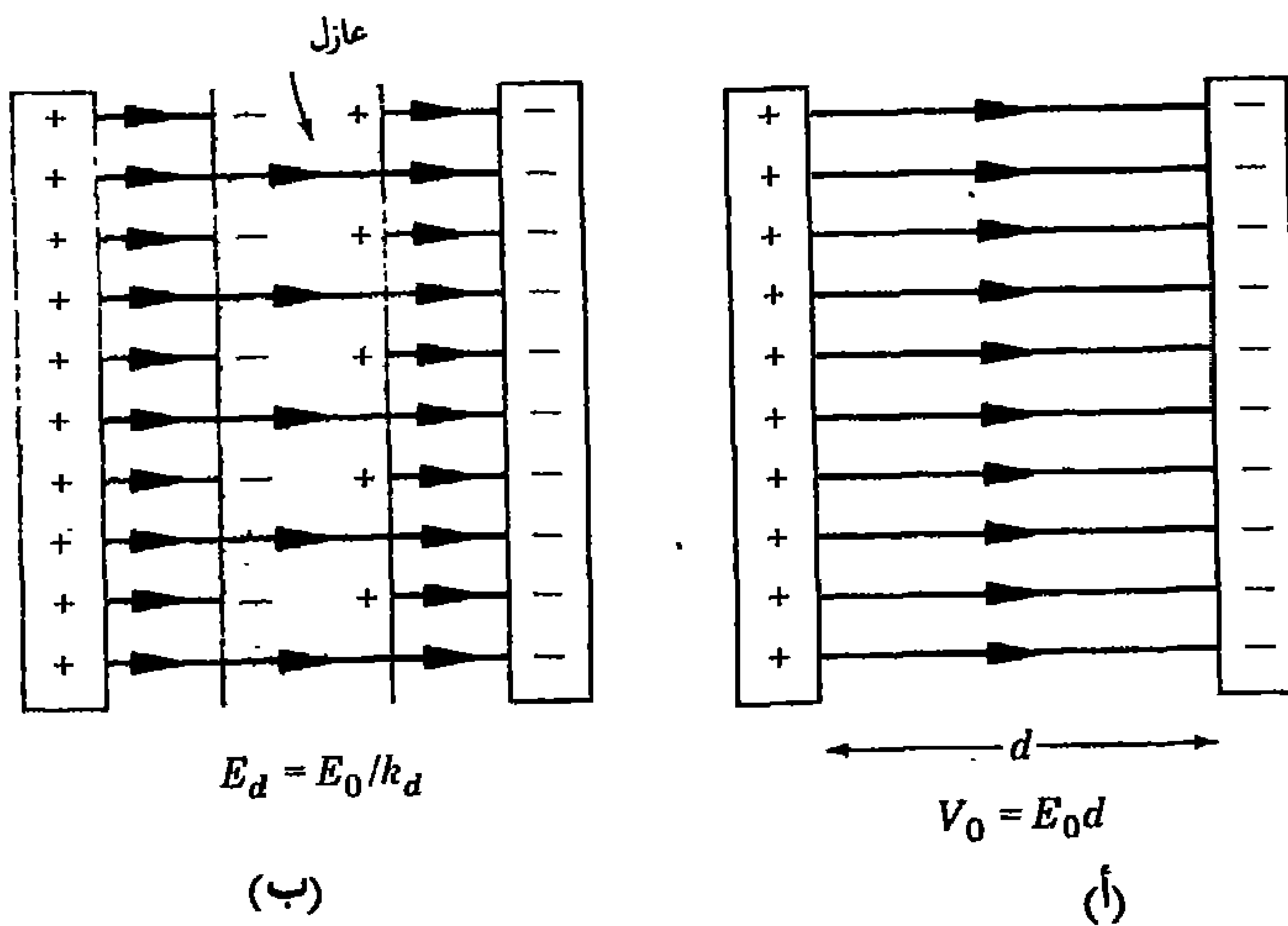
شكل (١٧ – ١٥) عندما يوضع عازل قطبى بين لوحين مشحونين فان الجزيئات تميل الى الاصطفاف فى المجال ، وهى بهذا تجعل مزيدا من الشحنات يسرى الى الألواح . لاحظ أن ترتيب الجزيئات مبالغ فيه فى هذا الشكل .

افترض أن عازلا يتكون من جزيئات ثنائية الاستقطاب قد وضع بين لوحين مشحونين . يقوم المجال الكهربائى بين اللوحين بلف الجزيئات القطبية بحيث تكون أطرافها السالبة أقرب ماتكون الى اللوح الموجب والعكس بالنسبة لأطرافها الموجبة ، ويوضح الشكل (١٧ – ١٥) هذا بطريقة تخطيطية . من الناحية العملية ، فان الحركة الحرارية للجزيئات لاتسمح لها بالترتيب بطريقة تقترب من الكمال . ونلاحظ أن الأطراف السالبة للجزيئات قد قامت بخلق شحنات سالبة فى الجانب الايسر للعازل . كما أن شحنات موجبة قد وجدت على الجانب الأيمن المعاكس . ويؤدى هذا الى خفض المجال الكهربائى فى داخل المنطقة الموجودة بين اللوحين كما سنرى .

يوضح الشكل (١٧ – ١٦أ) لوحين معدنيين مشحونين . ولنعتبر ان البطارية التى شحنتهما قد فصلت عن اللوحين حتى أن الشحنات لاتقدر على الحركة من أو الى الألواح . إذا كان المجال الكهربائى بين اللوحين هو E_0 والمسافة بين اللوحين d ، فإن فرق الجهد بين اللوحين يكون ببساطة $V_0 = E_0 d$ ، أما الشحنات Q_0 فوق اللوحين فتعطى بالمعادلة .

$$Q_0 = C_0 V_0 \quad \text{أو} \quad Q_0 = C_0 E_0 d \qquad (١٧ – ٧)$$

دعنا نفترض الآن أن صفيحة من عازل قد أدخلت بين اللوحين كما فى الشكل (١٧ – ١٦ب) . على الرغم من افتراضنا أن العازل يملأ الفراغ بين اللوحين تماما إلا أن المسافة التى تركت هى فقط للتوضيح ولتبسيط الوصف لما يجرى . نلاحظ أولا أن الشحنة على اللوح المعدنى لازالت Q_0 لأن البطارية قد فصلت وليس هناك فيض من الشحنات من أو الى الألواح . (فالعازل لايوصل) وعلى هذا فالمجال فى الفضاء الهوائى بين العازل واللوح لايزال E_0 . ولكن كما سبق أن أشرنا تتكون طبقة من



شكل (١٧ – ١٦) يقوم العازل بخفض المجال بين الالواح وهو بهذا يخفض فرق الجهد . هل يمكنك تقدير k_d للحالة الموضحة ؟

الشحنات السالبة على سطح العازل حيث تنتهى بعض خطوط المجال الصادرة عن اللوح الموجب . ولكن حيث أن الشحنات المتكونة على العازل أقل من الشحنات الموجودة على اللوح المعدنى ، لذا فبعض الخطوط لن تتوقف هناك بل ستستمر فى طريقها خلال العازل . وعليه فإن المجال E_d داخل العازل يكون أقل من E_0 .

إذا كان العازل يملأ تماما المنطقة بين الألواح المعدنية ، فان المجال سيكون فى كل نقطة مساويا E_d ويكون فرق الجهد هو $V_d = E_d d$. بالإضافة الى هذا ، إذا كانت سعة المكثف ذى اللوحين المتوازيين هى C_d فى حالة وجود العازل بين الألواح فإن ،

$$Q_0 = C_d V_d$$

وذلك لأن الشحنة Q_0 ستظل كما هى ، وبوضع $E_d d$ بدلا من V_d فان ،

$$Q_0 = C_d E_d d \qquad (\text{١٧ - ن})$$

إذا قسمنا هذه العلاقة على المعادلة رقم (١٧ - ٧) وأعدنا ترتيبها فان ،

$$C_d = (C_0)\left(\frac{E_0}{E_d}\right) \qquad (\text{١٧ - ٨})$$

أو بكلمات أخرى ، تزداد السعة الكهربائية متناسبة فى ذلك مع النسبة بين المجال الكهربائى الأصلى والمجال الكهربائى داخل العازل .

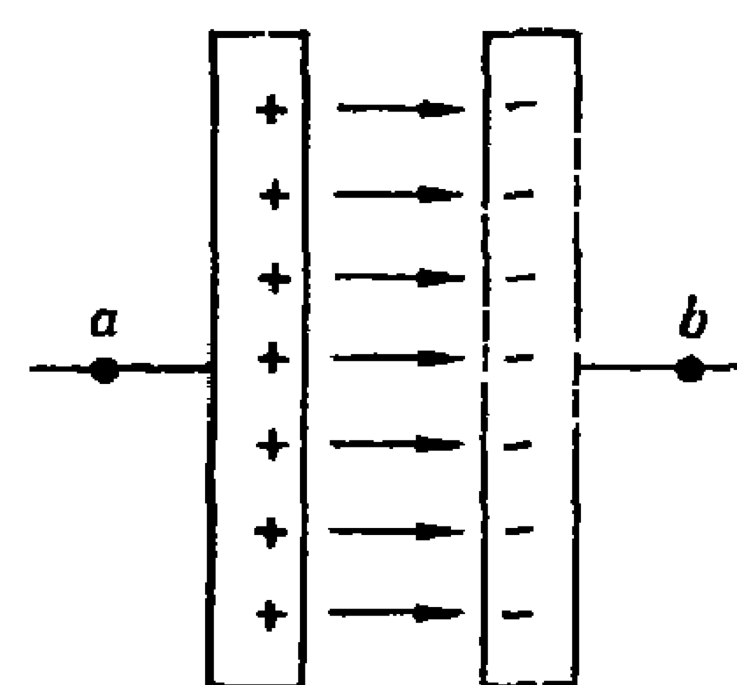
سنذكر أن ثابت العزل k_d لمادة عازلة قد عرف على أنه يساوى النسبة C_d/C_0 ومن المعادلة (١٧ - ٨) يعنى هذا أن المواد التى لها ثابت عزل كبير هى التى تخفض بشدة وكفاءة من المجال الكهربائى بين الألواح . او أن المادة ذات ثابت العزل الكبير هى تلك المادة التى تتكون الشحنات بسهولة على سطحها . كقاعدة عامة ، فان الجزيئات التى لها أكبر عزم لثنائى الاستقطاب سيكون لها بالتالى أكبر ثابت عزل ، حيث أن طبقة الشحنات المتكونة ستكون أكبر مايمكن . على أن الماء والكحول الميثيلى يعتبران استثناء لهذه القاعدة ، ففيهما ترتبط الجزيئات معا على شكل « مجموعات » بواسطة مايسمى بأربطة الايدروجين . وتتصرف هذه « المجموعات » الجزيئية كما لو كانت جزيئات لها عزم ضخم لثنائى الاستقطاب معطية بذلك ثابتا كبيرا للعزل كما هو مدرج بالجدول (١٧ - ٢٠) . وحتى الجزيئات التى ليست ثنائية الاستقطاب مثل البنزين ، والميثان ، الخ ، لها تأثيرات عزلية ملحوظة .

وتصبح هذه الجزيئات ثنائية الاستقطاب بواسطة القوى المشوهة للمجال الكهربائى الذى توضع فيه هذه الجزيئات .

أثر العازل على القوى

يعتبر ثوابت العزل للسوائل على درجة قصوى من الأهمية فى كثير من التفاعلات الحيوية والكيميائية ، نظرا لأن العوازل السائلة تغير القوى الموجودة بين الأيونات تغيرا عظيما ، وكما رأينا فالمجال الكهربائى بداخل العازل الموجود بين لوحى مكثف ليس الا $1/k_a$ من قيمته لو أن العازل لم يكن موجودا . وهذه العلاقة نفسها قائمة فى كثير من الحالات المعقدة . فإذا أثر أيونان كل على الآخر بقوة معينة وهما فى محلول ما ، فإن هذه القوة تتضاءل بمقدار $1/k_a$ إذا ماوجد أحد المذيبات . ولما كان ثابت العزل للماء 80 ، فالقوى الموجودة بين الايونات وهى فى الماء ليست إلا 1/80 من قيمتها لو لم يكن الماء موجودا . ونتيجة لهذا كان من السهل على الأيونين Na^+ و CL^- أن ينفصلا فى الماء إذا ماأذيب فيه NaCl نتيجة للحركة الحرارية البسيطة . على أنه فى البنزين تكون $1/k_a = 1/2.3$ أى أن القوى بين الأيونات تظل أكبر من ان تحطمها الحركة الحرارية ، اى أن البنزين لايذيب NaCl . وكثيرا من المحاليل المشابهة توجد فى الأنظمة الكيميائية والحيوية ، حيث تقوم الطبيعة العزلية للمذيب بدور العامل المتحكم .

١٧ – ١١ الطاقة المختزنة فى مكثف



شكل ١٧ – ١٧
الطاقة المختزنة فى مكثف تساوى الشغل المبذول فى شحنة ، $\frac{1}{2}QV$

افترض أن المكثف المشحون فى شكل (١٧ – ١٧) قد تم تفريغه عن طريق توصيل سلك من نقطة a الى نقطة b فإذا كان هذا السلك دقيقا بدرجة كافية فإنه خلال حركة الشحنات السالبة من اللوح السالب الى اللوح الموجب حيث تتعادل ، يصبح السلك ساخنا . وحيث أن الحرارة طاقة ، لذا فالمكثف المشحون ، والذى سبب ظهور الطاقة الحرارية ، يجب أن يكون قد اختزن قدرا من الطاقة بداخله وسنحاول حساب كمية الطاقة هذه .

لنعتبر أولا كمية الشغل المطلوبة لشحن هذا المكثف . وهذا الشغل سيكون هو نفسه كمية الطاقة المختزنة داخل المكثف . حين لايكون المكثف مشحونا ، لاتلزم أية كمية من الشغل لحمل شحنة موجبة صغيرة من اللوح b الى اللوح a ولكن كلما استمررنا فى حمل الشحنات ازداد المجال بين اللوحين وأصبح محسوسا بحيث انه يتحتم جذب الشحنات بقوة . وفى الحقيقة فإنه بشحن المكثف الى القدر الذى يصبح فيه فرق الجهد بين اللوحين هو V' فولت ، فإن الشغل المطلوب لحمل كمية صغيرة من الشحنة ΔQ سيصبح $\Delta QV'$

من الواضح ان أول شحنة حملت لم تتطلب شغلا لأن فرق الجهد V' كان صفرا . ولكن الدفعة الاخيرة من الشحنة حملت خلال فرق للجهد مقداره V عبر طرفى المكثف من لوح الى آخر ، ويمكننا باستخدام القوانين الرياضية إيجاد الشغل الكلى بسهولة . على أنه قد يكون من المنطقى أن نعتبر الشغل الكلى مكافئا للشغل اللازم

بذله لحمل الشحنة الكلية Q عبر فرق الجهد المتوسط خلال عملية الشحن ، وهو $\frac{1}{2}V$ وقد أمكن التحقق من صحة هذا الإفتراض . وعلى هذا تكون الطاقة المختزنة فى مكثف ذى شحنة Q وفرق للجهد مقداره V هى

طاقة المكثف (١٧ − ٩) الطاقة $= \frac{1}{2}QV$

باستخدام العلاقة $Q = CV$ فإن المعادلة (١٧ − ٨) يمكن كتابتها بصوره أخرى

الطاقة $= \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{Q^2}{2C}$

مثال توضيحى ١٧ − ٧ : مكثف قيمته $2\text{-}\mu F$ شحن من بطارية قوتها 12V ماهى الطاقة المختزنة فى المكثف ؟

طريقة الحل : لدينا

الطاقة $= \frac{1}{2}CV^2 = (\frac{1}{2})(2 \times 10^{-6})(144) = 1.44 \times 10^{-4}$ J

يجب على الطالب أن يتحقق من أن الوحدات المستخدمة فى هذه المعادلة تحقق الوحدات الناتجة ، وهنا تجب ملاحظة أنه من المعادلة $Q = CV$ أن 1F تكافىء 1C/V

١٧ − ١٢ الطاقة المختزنة فى مجال كهربائى

رأينا فى القسم السابق أن الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون هى $\frac{1}{2}CV^2$ حيث V هو فرق الجهد عبر المكثف ذى السعة C ... على الرغم من أنه ليس من الضرورى النص بدقة على كيف أو أين تم تخزين هذه الطاقة ، إلا أنه يكون من الملائم أحيانا أن نفكر فى الطاقة على أنها قد اختزنت فى المجال الكهربى بين ألواح المكثف . وبأخذ هذا فى الإعتبار فإنه من المستحسن التعبير عن الطاقة المختزنة بدلالة المجال الكهربائى E بين ألواح المكثف . ويمكننا عمل هذا اذا تذكرنا أنه للمكثف متوازى اللوحين تكون $V = Ed$ حيث d هى المسافة بين اللوحين .

شكل (١٥ − ١١)
تحدث الضربات عند اهتزاز مصدرين متشابهين بترددين مختلفين اختلافا صغيرا .

وعلى هذا تكون الطاقة المختزنة فى مكثف متوازى اللوحين هى

الطاقة $= \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}CE^2d^2$

ولكن المعادلة (١٧ − ٦) تعطينا قيمة السعة لمكثف متوازى اللوحين بدلالة المساحة للوح على أنها :

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

بحيث يكون المكثف محتويا على فراغ بين لوحيه ، أما إذا كان هناك عازل بين الألواح ولكن ثابت العزل هو k_d فأن

$$C = \frac{k_d \varepsilon_0 A}{d}$$

بالتعويض عن قيمة C فى معادلة الطاقة فإن

$$\text{الطاقة} = (\tfrac{1}{2}\varepsilon_0 k_d E^2)(Ad)$$

ولكن Ad هو حجم الفضاء بين ألواح المكثف او الحجم الذى يوجد فيه مجال كهربائى ثابت E بقسمة كلا الجانبين على الحجم نحصل على معادلة للطاقة لوحدة الحجوم ، أى الطاقة التى نتصورها مختزنة فى وحدة الحجوم من الفضاء الذى يكون فيه المجال الكهربى هو E . لدينا :

$$\text{الطاقة لوحدة الحجوم} = \tfrac{1}{2}\varepsilon_0 k_d E^2 \qquad (١٠ - ١٧)$$

نلاحظ أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم تتناسب مع مربع شدة المجال الكهربائى . ومن المناسب دائما استخدام المعادلة (١٧ - ١٠) كوسيلة لربط الطاقة بمجال كهربائى معين . وعلى الرغم من أن المعادلة قد اشتقت لحالة خاصة جداً ، إلا أنه فى كتب أكثر تقدما يوجد اثبات أن هذه المعادلة صالحة بشكل عام .

ملخص

تعمل البطاريات كمصادر للطاقة فى الدوائر الكهربائية ، فهى توفر فرقا للجهد تنحدر فيه الشحنات . وفرق الجهد بين طرفى بطارية معزولة كهربائيا يسمى القوة الدافعة الكهربائية لهذه البطارية (ε)

حينما تنحدر شحنة q خلال فرق للجهد V فإنها تكتسب طاقة قدرها qV . والشحنات الموجبة اذا تركت طليقة فإنها تنحدر من الجهد العالى الى الجهد المنخفض بينما تنحدر الشحنات السالبة فى الإتجاه المضاد .

يعرف التيار الكهربائى على أنه يأخذ اتجاه سريان الشحنات الموجبة ، فإذا كان لدينا فيض من الشحنات السالبة المتحركة فإن التيار الناشىء يعرف بأنه سريان فى الإتجاه المضاد . لو أن شحنة ΔQ تسرى عبر نقطة معينة فى زمن Δt فأن التيار I يعطى بالمعادلة $I = \Delta Q/\Delta t$ أما وحدات التيار فهى الأمبير (A)

عندما يوجد فرق للجهد V بين طرفى مقاوم ، فإن التيار خلال هذا المقاوم يرتبط مع V بالمعادلة $V = IR$ والكمية R هى مقاومة المقاوم وتقاس بالأوم (Ω) . ولاينص قانون أوم على أن $V = IR$ فقط ، بل ينطوى على أن المقاومة R مقدار ثابت ، لايعتمد على V أو I ويسرى التيار خلال مقاوم مامن طرفه ذى الجهد العالى الى طرفه ذى الجهد المنخفض .

يقوم الأميتر بقياس التيار الذى يسرى خلاله ، والإميتر الجيد له مقاومة صغيرة جدا . أما الفولتيمتر فيقيس فرق الجهد بين طرفيه ويجب أن تكون مقاومته عالية جدا .

تقيس مقاومية مادة ما ρ، مقاومة هذه المادة لسريان الشحنات ويمكن بدلالة هذه الكمية التعبير عن مقاومة سلك ماطوله L ومساحة مقطعة A بالمعادلة الآتية

$$R = \rho(L/A)$$

تتغير مقاومة معظم المواد مع درجة الحرارة ، فلو كانت α_{20} ، هى معامل تغير المقاومة مع درجة الحرارة باعتبار درجة 20° كمرجع فإن

$$\frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha_{20}(t - 20^\circ)$$

حيث R هى المقاومة عن درجة حرارة $t^\circ C$ ، R_{20} هى المقاومة عند $20^\circ C$. وهناك علاقة مماثلة لهذه مع استبدال ρ مكان R .

يعتبر المكثف أداة لتخزين الشحنة ، فهو يحمل شحنات متساوية ومتضادة على لوحيه . لو أن فرقا للجهد مقداره V قد أوجد شحنات Q على ألواح المكثف عندما يوجد بين طرفيه ، فإن السعة C تعطى بالمعادلة $C = Q/V$ ووحداتها هى الفاراد (F) . وسعة مكثف متوازى اللوحين عندما تكون مساحة اللوح هى A والمسافة بين اللوحين d هى $C = \varepsilon_0 A/d$ حيث ε_0 ، هى مجاوزية الفراغ الحر وتساوى 8.85×10^{-12} F/m

تقوم العوازل عادة بخفض المجال الكهربائى الذى توضع به . والمكثف متوازى اللوحين ذو شحنة Q سيكون المجال بين لوحيه أقل بما قيمته $1/k_d$ عندما يملأ الفراغ بين اللوحين بواسطة عازل ما . والكمية k_d تسمى ثابت العزل لذلك العازل وهى تساوى 80 تقريبا . بالنسبة للماء وتتراوح بين 592 لمعظم الزيوت والمواد المشابهة أما فى الفراغ فإن $k_d = 1$.

يختزن المكثف المشحون طاقة مقدارها $\frac{1}{2}QV$ كما أن الطاقة يمكن اعتبارها مختزنة فى المجال الكهربائى . إذا كان هناك عازل ثابتة k_d وكان المجال الكهربائى هو E فإن الطاقة المختزنة لوحدة الحجوم هى $\frac{1}{2}\varepsilon_0 k_d E^2$

الحد الادنى من الاهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تذكر الغرض من البطارية فى دائرة بسيطة ، وأن تشرح ماالمقصود بالقوة الدافعة الكهربية لها (ق د ك)

٢ – أن توجد التغير فى طاقة الحركة لشحنة موجبه او سالبة معروفتين اذا تحركت خلال فرق معلوم للجهد ، واذا ماعرفت السرعة الابتدائية فإنك تستطيع ايجاد السرعة النهائيه (مع اهمال أية تأثيرات نتيجة النسبية) .

٣ – ان تصف مدفعا الكترونيا بسيطا .

٤ – أن تذكر التغير فى الطاقة مقدرا بوحدات الالكترون – فولت لشحنة q حين تنحدر فى فرق معلوم للجهد وأن تحول الطاقة من الكترون فولت الى جول (J) والعكس بالعكس .

٥ – أن تفيد من العلاقة $I = \Delta Q/\Delta t$ فى مواقف بسيطة وأن تعرف التيار بكلمات بسيطة من تعبيرك .

٦ – أن تفسر رسما لدائرة بسيطة كذلك الذى فى الشكل ١٧ – ٨ وأن تذكر فرق الجهد بين أى زوج من النقط فى الدائرة .

٧ – أن تذكر أى أطراف المقاوم عند الجهد الأعلى عندما يكون اتجاه سريان التيار خلال المقاوم معلوما .

٨ – أن تذكر شكل المعادلة التى تعبر عن قانون أوم وأن تشرح معناها وأن تستخدم المعادلة فى تعريف المقاومة ووحداتها .

٩ – ان توضح كيفية توصيل الاميتر – فى دائرة معطاه – لقياس التيار فى سلك معين .

١٠ – أن توضح كيفية توصيل الفولتميتر – فى دائرة معطاه – لقياس فرق الجهد بين نقطتين فى الدائرة .

١١ – أن تحسب قيمة المقاومة لقطعة معينة من السلك ، اذا علمت مقاومية مادة السلك

١٢ – أن توجد مقاومة سلك ماعند درجة حرارة معينة اذا علمت قيمة المقاومة ومعامل تغيرها مع درجة الحرارة عند درجة حرارة مرجعية .

١٣ – أن ترسم مكثفا متوازى اللوحين وتوجد العلاقة بين C ، Q ، V لهذا المكثف وأن تذكر وحدات C .

١٤ – أن تحدد طريقة يمكنك بها تعيين ثابت العزل لسائل ما . اذا ماأتيح لك جهاز لقياس السعة .

١٥ – أن تحسب الطاقة المختزنة فى مكثف ماحينما يشحن حتى فرق معلوم للجهد .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من

ق . د . ك .

ان الشحنات الموجبة تنحدر من + الى − بينما تفعل الشحنات السالبة العكس .

الالكترون − فولت

$I = \Delta Q / \Delta t$ ، الأمبير

قانون أوم ، $V = IR$

المقاومية ، $\rho = RA/L$

$$(R - R_{20})/R_{20} = \alpha_{20}(t - 20°)$$

$Q = CV$ ، الفاراد

ثابت العزل k_a

الطاقة = $\frac{1}{2}QV$

أسئلة وتخمينات

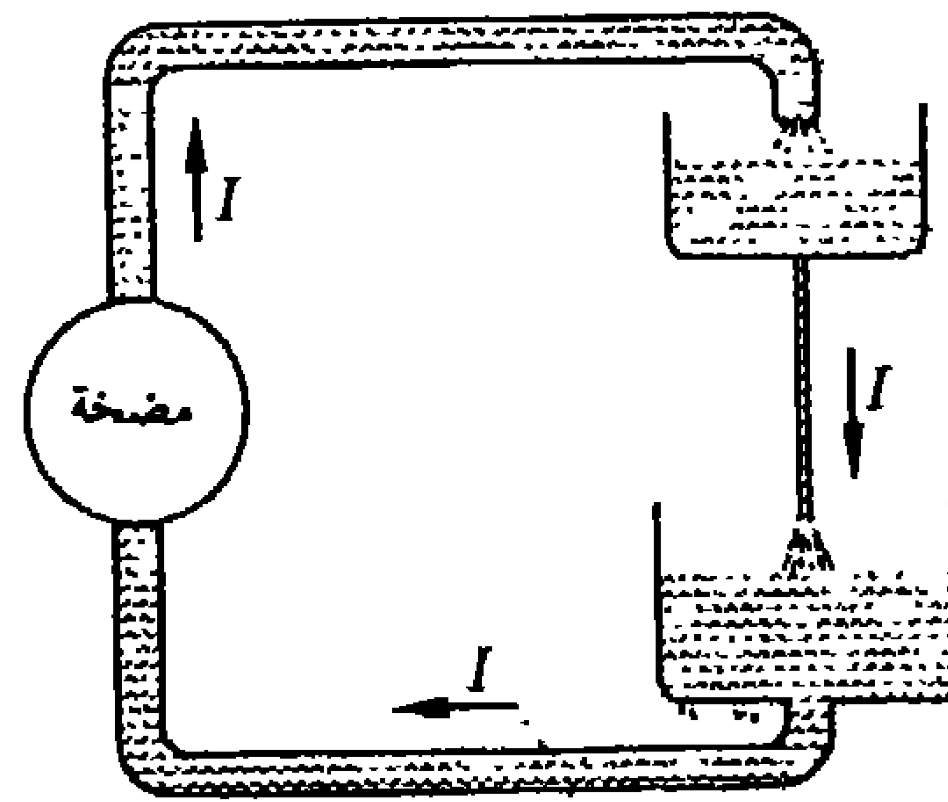
١ − يصر بعض الطلاب أحيانا على أن التيار« يستهلك »كلما مر فى مقاوم . إذا أخذنا مثالا من الماء فكيف يمكنك اقناع الطالب أن التيار لايفقد فى المقاوم ؟

٢ − كيف يمكن معرفة أى أطراف البطارية عند الجهد العالى أى موجب حسب الرسم التخطيطى للدائرة ؟ للمقاوم ؟

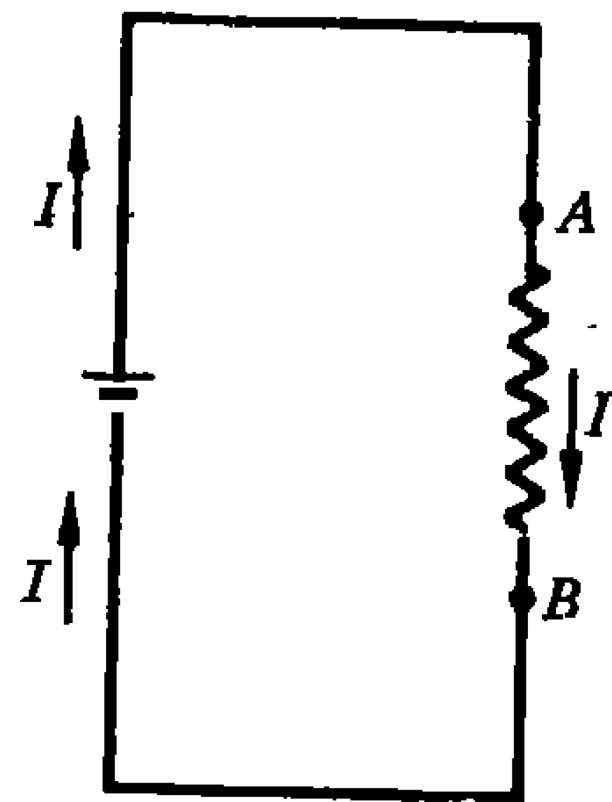
٣ − لايفقد تيار أو فرق جهد أبدا فى دائرة . ماالذى يفقد إذن عندما يسرى التيار فى الدائرة ؟

٤ − تعتبر مصابيح الإضاءة الفلورية عادة ، اكثر كفاءة فى انبعاث الضوء من المصابيح المتوهجة ، بمعنى أنه بنفس الطاقة المستخدمة يقوم المصباح الفلورى باعطاء ضوء أكثر من المصباح المتوهج . المس كلا المصباحين بعد أن يكونا قد اشتعلا لعدة دقائق . اشرح لماذا كان المصباح المتوهج أقل كفاءة كباعث للضوء .

٥ − فى الشكل م (١٧ − ١أ) أ تقوم المضخة برفع الماء الى المستودع الأعلى بحيث يظل مستوى الماء ثابتا . ينساب الماء ببطء من الانبوبة الضيقة ليصب فى المستودع الأسفل . أشر الى أوجه الشبه بين هذه الدائرة المائية والدائرة الكهربية فى الجزء (ب)



(أ)



(ب)

شكل (م ١٧ − ١)

٦ – شحن مكثف متوازى اللوحين بشحنة ثابته Q (فصلت البطارية بحيث أن الشحنات لاتستطيع أن تجرى منها أو اليها) سحب اللوحان بعيدا عن بعضهما الى حد ما . يقوم من يسحب اللوحين بعمل شغل فى هذه العملية . لماذا ؟ هل يتغير فرق الجهد بين اللوحين خلال هذه العملية ؟ ماذا يحدث للشغل المبذول بواسطة الساحب .

٧ – هناك قدر كبير من الشبه بين الشرارة التى تحدث فى مكثف هوائى وومضة البرق خلال عاصفة رعدية . اشرح كيفية هذا التشابه .

٨ – اشرح لماذا يجب أن تكون مقاومة الاميتر صغيرة . ماهى الاحتياطات الواجبة فى تناول الأميتر ؟

٩ – لماذا يجب أن تكون للفولتميتر مقاومة كبيرة ؟

١٠ – اذا وضع لوح من المعدن بين لوحى مكثف بدون أن يمسهما ، هل سيكون ذا ثابت عزل كبير أم صغير ؟ اشرح .

١١ – حين ينقذف الشعاع الالكترونى عبر طول أنبوبة التليفزيون ، ماهى – بالتقريب – المسافة التى ستهبطها الالكترونات تحت تأثير الجاذبية الارضية ؟ هل يمكن لجهاز التليفزيون أن يعمل اذا وضع على ظهره بحيث ينقذف شعاع الالكترونات الى أعلى ؟

١٢ – استعمل اوميتر (هو أساسا بطارية متصلة على التوالى مع جهاز قياس حساس جدا) لقياس مقاومتك من يد لاخرى . هناك تيار يبلغ حوالى 0.03A وهو كاف اذا مر خلال الجزء الأوسط من جذع الانسان أن يحدث شللا فى الجهاز التنفسى . ماهو فرق الجهد اللازم لصعقك اذا وضع بين يديك ؟

مسائل

١ – ينحدر الكترون من السكون ($m = 9.1 \times 10^{-31}$ Kg, $q = -e$) مبتدأ من فتيلة سالبة الى لوح موجب داخل انبوبة تفريغ ، وقد وصل طرفا بطارية قوتها 12.0v الى اللوح والفتيلة .

(أ) ماهى سرعة الالكترون قبيل اصطدامه باللوح مباشرة ؟ (ب) وماهى طاقة حركته مقدرة بالالكترون فولت فى تلك اللحظة ؟

٢ – أيراد تعجيل بروتون من السكون وحتى سرعة مقدارها 5.0×10^{6}m/s (أ) ماهى قيمة فرق الجهد الذى يجب أن ينحدر فيه البروتون ؟ (ب) كم ستكون طاقة حركة البروتون بالالكترون فولت ؟ ($m_P = 1.67\times10^{-27}$Kg , $q=e$)

٣ – قذف بروتون بطاقة حركة مقدارها 5000ev من لوح سالب تجاه لوح موجب وكان فرق الجهد بين اللوحين 1500 V أ) مامقدار طاقة الحركة (بالالكترون فولت) التى سيفقدها البروتون حين تصطدم باللوح الموجب ؟

كم ستكون طاقة حركته (بالالكترون فولت) قبيل اصطدامه باللوح مباشرة ؟ ح) أعد الحل بالنسبة لجسيم الفا α (شحنة جسيم الفا وهو عبارة عن نواة هليوم هى $q= +2e$.)

٤ – عجل الكترون يتحرك بسرعة مقدارها 5×10^{6}m/s خلال فرق للجهد مقداره 20V ماهى سرعته الجديدة ؟

٥ – سحب تيار مقداره 2.0A من بطارية ٦ – فولت لمدة 20 min أ) ماهى الشحنة وكم من الالكترونات تخرج من البطارية فى هذه الفترة الزمنية ؟

٦ – تقوم آلة لقذف الذرات بانتاج تيار قدره 0.0010 A (١ مللى امبير = 1m A) خلال فرق للجهد مقداره 1 MV. أ) مامقدار الشحنة التى تنتجها فى زمن قدره ½ h ب) اذا كان التيار مكونا من فيض من البروتونات فكم عدد البروتونات المنتجة فى نصف ساعة (½ h) ؟

٧ – يسحب مصباح إنارة عادى ، شدته 60W تيارا قدره 0.5A حين يكون فرق الجهد بين طرفيه 120V . ماهى مقاومة المصباح ؟

٨ – كم من التيار يسرى من بطارية 12 V حين يتصل بين طرفيها مقاوم قيمته 3.0-Ω

٩ – سلك من النحاس رقم 10 قطره 2.59 mm . القيمة التقريبية للتيار الآمن الذى يمر فى مثل هذا النوع من السلك هى 30A (اذا زاد التيار عن هذا ، يصبح السلك ساخنا جدا) . أ) اوجد مقاومة قطعة من هذا السلك طولها 5.0m عند درجة حرارة 20°C ب) ماهو فرق الجهد الذى سيتكون بين طرفى هذه القطعة من السلك حين تحمل تيارا قدره 30A ؟

١٠ – فى مصباح إنارة عادى كان طول الفتيلة 8 cm وقطرها 0.150 mm . حين يوصل المصباح عبر 120 V فان الفتيلة تصبح محماة لدرجة الابيضاض ويقوم المصباح بسحب تيار مقداره 0.25A أ) ماهى مقاومة المصباح تحت هذه الظروف ؟ ب) ماهى مقاومية مادة الفتيلة عند درجة الحرارة هذه ؟

١١ – مصباح عادى ذو فتيلة من التنجستن شدته 60W مقاومته 240 Ω حين يكون مضاءاً . تبلغ درجة حرارة الفتيلة 2000°C تقريبا تحت هذه الظروف . اذا اعتبرنا قيمة α فى الجدول (١٧ – ١) صالحة حتى هذه الدرجات العالية للحرارة ، فما هى مقاومة المصباح عند 20°C ؟

١٢ – تبلغ مقاومة مصباح خاص ذى فتيلة من التنجستن 30 Ω عند درجة حرارة 20°C . حين يضاء المصباح تبلغ مقاومته 240 Ω كم تبلغ درجة حرارة الفتيلة الساخنة بالتقريب ؟

١٣ –* يتصل مقاوم من الجرافيت على التوالى مع مقاوم حديدى مقداره 10-Ω (عند 20°C) كم يجب أن تكون قيمة مقاوم الجرافيت حتى تكون مقاومة المجموعة غير معتمدة على درجة الحرارة ؟

١٤ –** يراد صنع مقاوم 100-Ω يكون غير معتمد على درجة الحرارة وذلك باستخدام مقاوم من الكربون متصل على التوالى مع مقاوم من الحديد . كم يجب أن تكون مقاومة كل منهما عند 20°C ؟

١٥ – مكثف نموذجى يستخدم فى الراديو تبلغ سعته 2.0×10^{-8} F مامقدار الشحنة الموجودة على هذا المكثف حين يتصل عبر بطارية 9.0-V

١٦ – وضع لوحان متماثلان من المعدن متوازيين أمام أحدهما الآخر وكانت المسافة بينهما 0.50 mm ومساحة وجه كل منهما 400 cm^2 أ) اوجد سعة الالواح حين يكون بينهما هواء . ب) اذا وصل هذا المكثف ببطارية 12 V فكم من الشحنة ستكون على المكثف ؟ جـ) أعد أ) وب) اذا كان الفراغ بين اللوحين مملوءً بمادة البوليستيرين .

١٧ – مكثف ماسعته 1.750×10^{-9} F حين يكون الحيز بين الواحة مملوء بالهواء كم تبلغ سعته اذا ملىء هذا الحيز بالأسيتون ؟

١٨ – كم من الطاقة يختزن فى مكثف سعته 2-μF حين يشحن الى فرق جهد مقداره 300 V ؟

١٩ –* مكثف متوازى اللوحين يمكن ضبط المسافة بين لوحيه دون الاخلال بباقى الدائرة الكهربية . كانت السعة فى الوضع A هى 3.0×10^{-9}F وفى الوضع B هى 2.7×10^{-9} F شحن المكثف وهو فى الوضع A من بطارية 12 V ثم فصلت البطارية وغير وضع المكثف الى B بدون تغيير الشحنات التى على ألواحه . أ) ماهى الشحنة الموجودة على المكثف ؟ ، (ب) ماهو فرق الجهد عبر المكثف فى الوضع B . ج) بكم تتغير الطاقة المختزنة فيه حين يتحول من الوضع A الى الوضع B ؟ د) ماهو الحد الادنى من الشغل الذى يجب بذله لتحويل المكثف من الوضع A الى B ؟

الفصل الثامن عشر

دوائر التيار المستمر

درسنا فى الفصل السابق بعض عناصر الدائرة الكهربائية المختلفة مثل البطاريات والمقاومات . وهذه العناصر تتصل معا بطرق عديدة لتكون دوائر كهربائية عملية . سنقوم فى هذا الفصل بتحليل مثل هذه الدوائر وسنجد أن هناك قاعدتين بسيطتين تدعيان قاعدتا كيرتشوف وتتيحان أساسا منظما لتحليل الدوائر . سنتعلم فى هذا الفصل أيضا بعض الشيء عن القدرة الكهربائية والافكار الأساسية للأمان الكهربائى .

١٨ - ١ قاعدة النقطة لكيرتشوف

هناك قاعدتان أساسيتان تنطبقان على جميع الدوائر الكهربائية . ومن السهل فهم هاتين القاعدتين وحفظهما لانهما تكادان تكونان بديهيتين . ولمعرفة ما تنطوى عليه القاعدة الأولى لنرجع الى الشكل (١٨ - ١)

فى الجزء (أ) نرى موقفا معينا حيث تلتقى مجموعة من الأسلاك عند نقطة اتصال . ولنعتبر النقطة A . التيار الذى يسرى فى هذه النقطة هو I والتيارات الخارجة منها هى I_1 ، I_2 ، I_3 . ماذا عن هذه التيارات ؟ يمكن الاجابة عن هذا السؤال بسهولة لو عقدنا مقارنة مع أنابيب المياه . الكمية I قد تمثل تيارا يبلغ عدة سنتيمترات مكعبة من المياه تندفع الى النقطة A كل ثانية فاذا لم يكن هناك تسرب بالانابيب ، فان نفس كمية المياه بالضبط سوف تخرج من النقطة A كل ثانية . بطريقة أخرى ، لما كانت النقطة A لايمكنها تخزين المياه فهى تصرف من المياه بقدر مايندفع اليها . اذا عبرنا بالمعادلات فانه فى هذه الحالة ، التيار الداخل الى A= التيار الخارج من A وتصبح

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

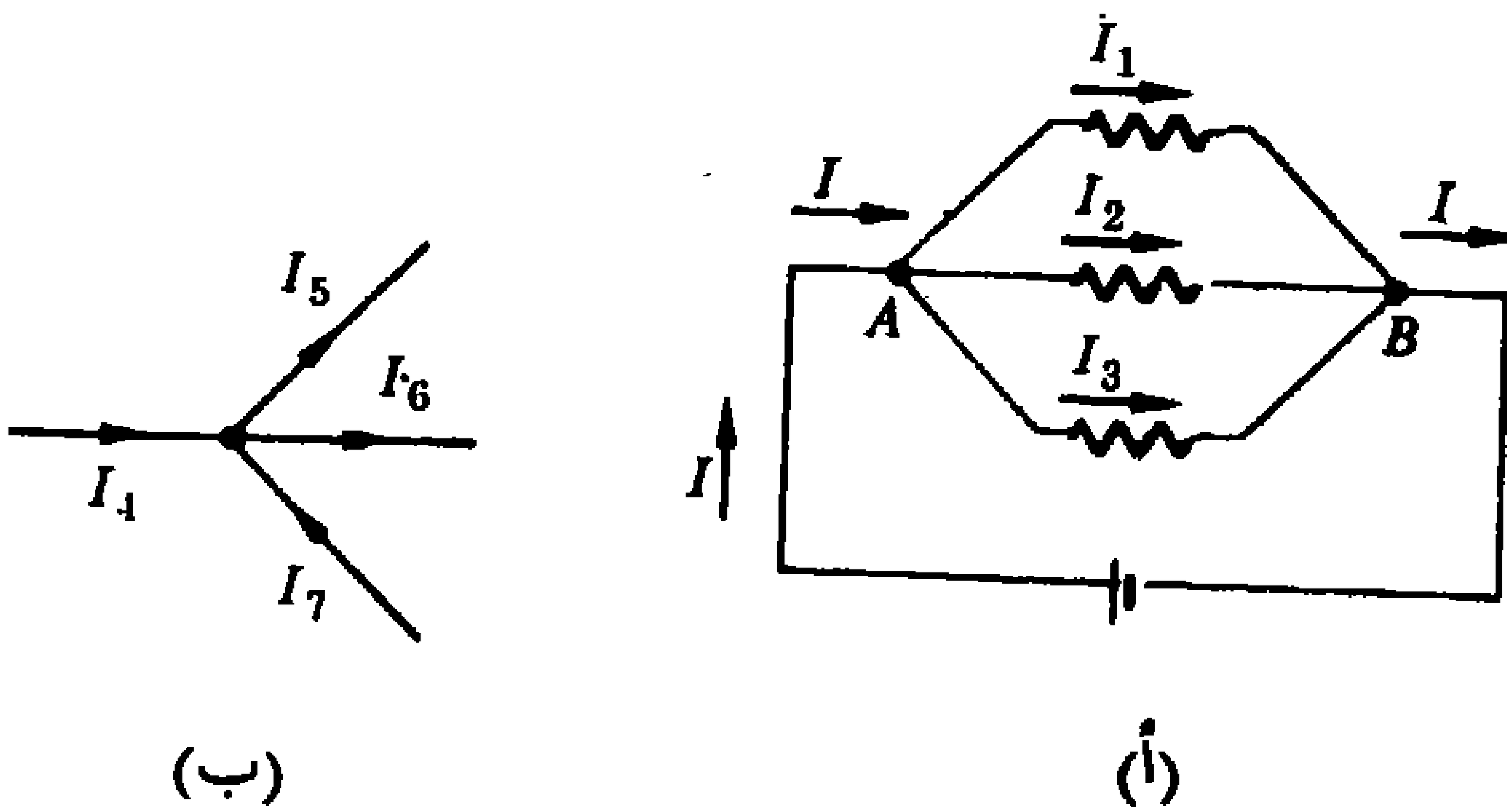
الموقف بالنسبة للشحنات مشابه لهذا الموقف . فالتيار الذى يفد الى النقطة A يجب أن يساوى التيار الذى يفيض خارجا من النقطة A . وفى هذه الحالة أيضا يكون $I=I_1+I_2+I_3$. بالاضافة الى هذا فان هذه القاعدة يجب أن تنطبق على أية نقطة أخرى فى الدائرة . فعند النقطة B على سبيل المثال

التيار الداخل الى B = التيار الخارج من B وتصبح

$$I_1 + I_2 + I_3 = I$$

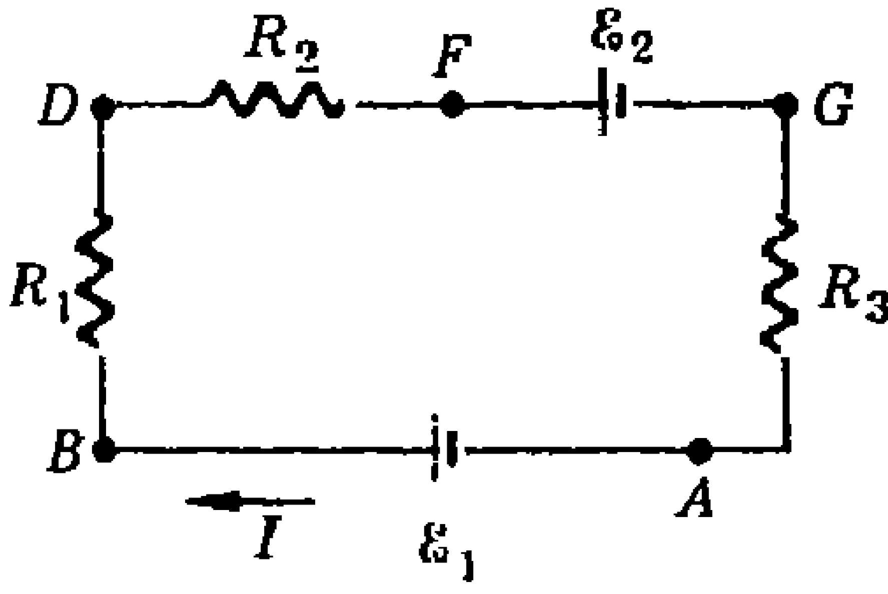
وهى معادلة مطابقة للمعادلة الخاصة بالنقطة A .

سنلخص هذه النتيجة فيما يسمى **بقاعدة النقطة لكيرتشوف** :



شكل (١٨ - ١)
تفيد قاعدة النقطة بأن
$I = I_1 + I_2 + I_3$
وأن $I_4 + I_7 = I_5 + I_6$.

مجموع كل التيارات الداخلة الى نقطة مايجب أن يساوى مجموع كل التيارات الخارجة من هذه النقطة **قاعدة النقطة**



شكل (١٨ - ٢)
بم تفيدنا قاعدة العروة لكيرتشوف عن هذه الدائرة ؟

سنكتشف أن هذه القاعدة البسيطة على درجة كبيرة من الأهمية . هل يمكنك أن توضح كيف يمكن بتطبيق هذه القاعدة على الشكل (١٨ - ١ب) أن تصل الى أن $I_4 + I_7 = I_5 + I_6$

١٨ - ٢ قاعدة العروة (أو الدائرة) لكيرتشوف

تنطبق هذه القاعدة الثانية على الدوائر التي يكون فيها التيار ثابتا أو متغيراً ببطء * وفى هذه الحالات يكون المجال الكهربائى بالقرب من الدائرة مجالا ساكنا (كهروستاتيكيا) بالضرورة . وتحت مثل هذه الظروف يكون المجال احتفاظيا بمعنى أن الشغل المبذول لحمل شحنة اختبار موجبه من نقطة لاخرى لايكون معتمدا على المسار المتبع . ولنر الآن ماذا يمكن أن نقول عن الدائرة الكهربية فى الشكل (١٨ - ٢) .

افترض أننا بدأنا عند النقطة A فى الدائرة وقمنا بحمل شحنة اختبار موجبة على طول الدائرة مارين بالنقط B ، D ، F ، G ،، لنعود مرة أخرى الى A . ماهى الكمية الكلية للشغل الذى بذلناه لحمل شحنة الاختبار حول الدائرة حتى عدنا مرة أخرى لنقطة البداية ؟ . حيث أن هذا قد حدث فى مجال احتفاظى فالاجابة هى صفر .

والموقف هنا يشبه الى حد كبير الموقف الذى يتضمن مجالا للجاذبية وهو أيضا مجال احتفاظى . افترض انك نهضت فى الصباح من فراشك وانك عدت اليه ليلا . كمية الشغل الصافية التى بذلتها طوال اليوم على جسدك ضد مجال الجاذبية هى صفر . وحيث أن نقطتى البداية والنهاية هما نفس النقطة لذا فطاقة وضع الجاذبية لجسدك لم تتغير . ويكون الشغل الكلى المبذول ضد الجاذبية صفرا .

نلاحظ فى حالة الدائرة الكهربائية فى شكل (١٨ - ٢) صحة مايلى . اذا حملنا شحنة اختبار موجبة حول الدائرة وعدنا بها مرة أخرى الى نقطة البداية ، فان الشغل الكلى المبذول يكون صفرا . وهذا يجب أن يعنى أن الشحنة قد حملت خلال كميات متساوية من الجهد المرتفع والجهد المنخفض والأثر النهائى لتغيرات الجهد هذه (ارتفاع الجهد سيعتبر موجبا وانخفاضه سالبا) أن المجموع الجبرى لها يكون صفرا . وهذه الحقيقة يمكن تلخيصها فى **قاعدة العروة (أو الدائرة) لكيرتشوف** :

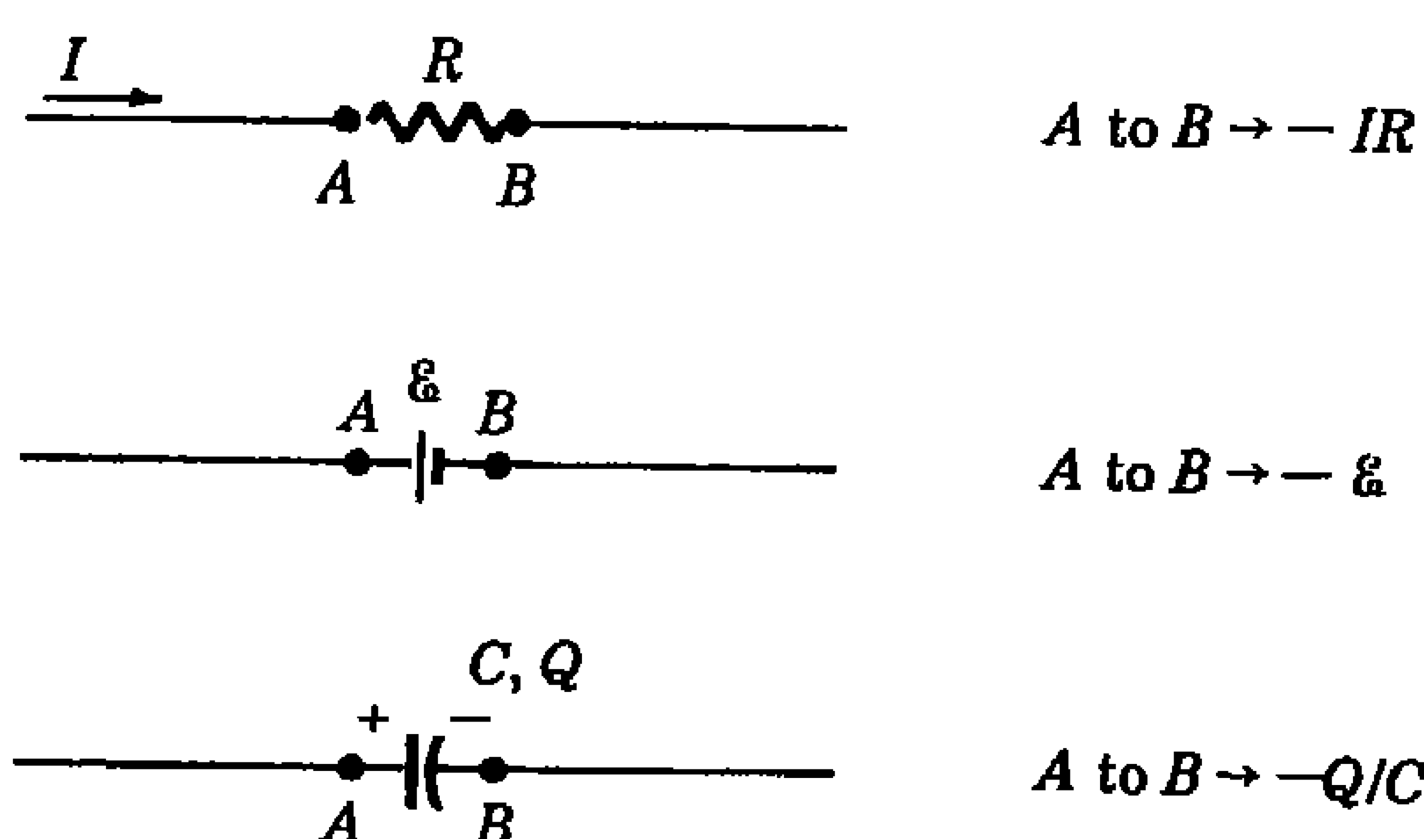
* كما سنرى مستقبلا فان التيار اذا كان مترددا فى مدى الترددات الميكروئيه $(10^9 HZ)$ فان القوى الدافعة الكهربية التأثيرية ق . د . ك فى عروة الدائرة تصبح هامة .

قاعدة العروة « المجموع الجبرى لتغيرات الجهد حول دائرة مغلقة يجب أن يساوى صفرا »

وبطريقة أخرى اذا بدأنا عند نقطة مافى دائرة وتحركنا حول هذه الدائرة بحيث نرجع الى نقطة البداية ، فإن المجموع الجبرى لارتفاع وانخفاض الجهد اللذين نقابلهما يجب أن يكون صفرا . ونعتبر انخفاض الجهد سالبا وارتفاعه موجبا .

كما نرى ، ترتبط قاعدة العروة ارتباطا وثيقا بتغيرات الجهد ، ولهذا السبب سنقوم باستعراض كيفية تغير الجهد اذا ماتحركنا عبر مقاوم ، بطارية ، ومكثف .

افترض اننا نتحرك من A الى B عبر المقاوم الموضح فى شكل (١٨ – ٣) اننا نعلم ان التيار يسرى دائما من الجهد العالى الى المنخفض خلايا مقاوم ما . وعلى هذا فان النقطة A تقع عند جهد أعلى من جهد النقطة B . ونتيجة لهذا يكون التغير فى الجهد من A الى B عبارة عن انخفاض فى الجهد . ويفيدنا قانون أوم بأن مقدار هذا الانخفاض هو IR . والتغير فى الجهد عند الانتقال من A الى B يساوى $-IR$. والاشارة السالبة تعنى انخفاض الجهد .



شكل (١٨ – ٣) فى كل من الحالات الموضحة ، يكون الانتقال من A الى B انخفاض فى الجهد او تغير سالب فى الجهد . فى الاتجاه المضاد يكون تغير الجهد موجبا . (١) الى

اذا مانظرنا الى البطارية فى الشكل ١٨ – ٣ لتذكرنا أن رمزها يفيد بأن الجانب الأيسر موجب . وعلى هذا تكون النقطة A أعلى فى الجهد بمقدار ε عن النقطة B وبالانتقال من A الى B يكون التغير فى الجهد هو $-\varepsilon$

فى حالة المكثف ، يجب ذكر أى اللوحين مشحون بشحنة موجبة ، وحسب الرسم فان اللوح A هو الموجب ، ولذا فهو عند الجهد الأعلى . ولما كان فرق الجهد عبر المكثف يعطى بالمعادلة $Q = CV$ أى أنه يساوى Q/C لذا فتغير الجهد فى الانتقال من A الى B يكون مساويا $-Q/C$

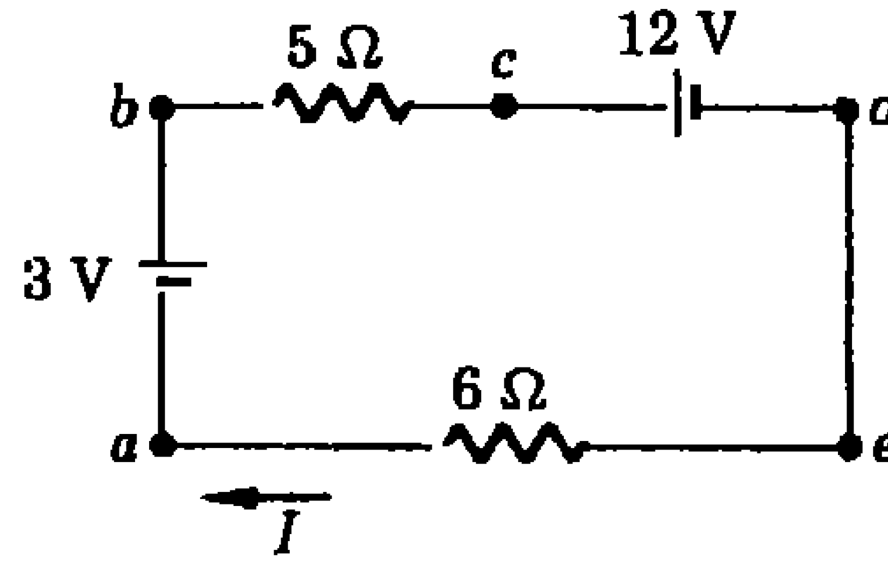
عند الانتقال من A الى B فى كل من الحالات الثلاث كان تغير الجهد سالبا ولو أن الانتقال كان من B الى A اذن لكان التغير فى الجهد موجبا . ولنحاول الآن

استخدام قاعدة العروة فى بعض الدوائر البسيطة قبل أن ننتقل الى تطبيقاتها الأكثر جدية .

مثال توضيحى ١٨ – ١ : اوجد التيار الذى يسرى فى الدائرة المرسومة فى الشكل ١٨ – ٤ .

طريقة الحل : دعنا نخمن أن التيار سوف يُسرى فى الاتجاه المبين . (لابد أنك ستعترض أن هذا خطأ حيث أن البطارية 12 - V سيكون لها تأثير أكبر من البطارية 3 -V ولكن من أحسن الأشياء حول قواعد كيرتشوف أنها قابلة للاستعمال حتى من قبل أسوأ المخمنين كما سنرى) نختار نقطة ما مثل a ونتحرك حول الدائرة . تكون تغيرات الجهد بالفولت كما يلى :

$$\begin{array}{ll} a \to b: & +3 \\ b \to c: & -5I \\ c \to d: & -12 \\ e \to a: & -6I \end{array}$$



شكل ١٨ – ٤
حين نقوم بحل هذه الدائرة فكيف يمكن من الاجابة معرفة ماذا كان اختيارنا لاتجاه التيار I كان خاطئا ؟

عليك بفحص هذه الكميات للتأكد من الاشارات المستخدمة . يجب أن يكون مجموع هذه التغيرات فى الجهد مساويا الصفر . وعلى هذا

$$3 - 5I - 12 - 6I = 0$$

اذا ماحللنا من اجل الحصول على I نجد ان $I = -\frac{9}{11}$A . تفيدنا الاشارة السالبة أننا قمنا بتخمين الاتجاه الخاطىء للتيار ، وليس هناك مايسوء

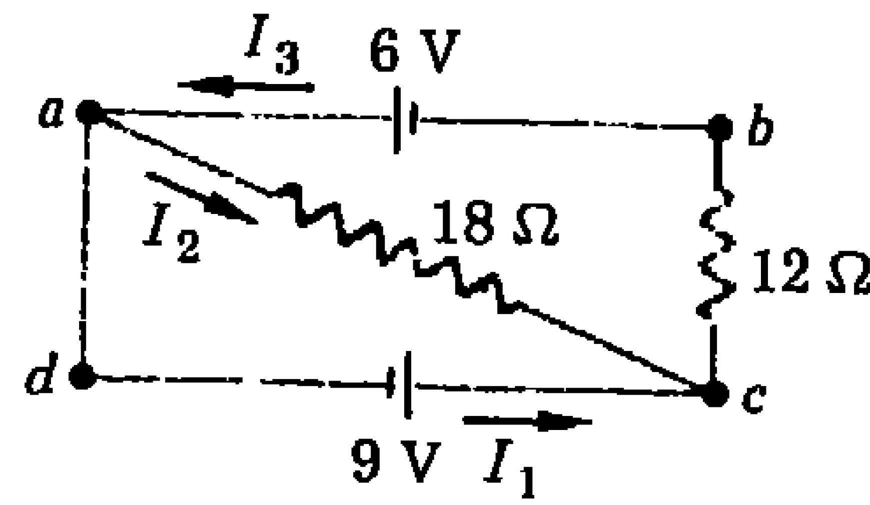
افترض أننا درنا حول الدائرة فى الاتجاه المضاد ، ستكون المعادلة فى هذه الحالة هى :

$$+6I + 12 + 5I - 3 = 0$$

ومنها يكون التيار $I = -\frac{9}{11}$ A كما سبق .

عند حل هذه الدائرة ، كن متأكدا انك قد فهمت اختيارنا لاشارات تغيرات الجهد . ولاحظ ايضا ان التيار هو نفسه فى جميع نقط الدائرة . لماذا ؟

مثال توضيحى ١٨ – ٢ : اوجد التيارات التى تسرى فى جميع أسلاك الدائرة فى الشكل (١٨ – ٥)



شكل (١٨ – ٥)
اوجد التيارات التى تسرى فى الأسلاك الثلاثة .

طريقة الحل : سنقوم بتعيين تيارات لجميع الأسلاك واعطاء كل من هذه التيارات رمزا واتجاها خاصين . ومرة أخرى سننفق بعض الوقت فى محاولة تخمين الاتجاه الصحيح لأن الاجابة ستشير على أية حال الى الاتجاه .

لنبدأ من النقطة a متتبعين العروة $acda$ ثم نكتب قاعدة العروة ، لدينا بالفولت (تأكد من فهمك للاشارات المستعملة) .

$$-18I_2 - 9 = 0$$

ومنها نجد على الفور أن ،

$$I_2 = -0.50 \text{ A}$$

أى أن التيار يسرى فى اتجاه عكس كما هو مبين .

دعنا الآن نتحرك حول العروة $abcda$ ، لدينا

$$-6 + 12I_3 - 9 = 0$$

ومنها

$$I_3 = 1.25 \text{ A}$$

ويمكننا أيضا كتابة معادلة العروة $abca$ ولكننا لن نحصل على أية تغييرات جديدة فى الجهد أى أن مثل هذه المعادلة لن تحتوى على معلومات جديدة ولهذا فهى زائدة عن الحاجة .

سنقوم بدلا من هذا بكتابة قاعدة النقطة بالنسبة للنقطة c ، وهى

$$I_1 + I_2 = I_3$$

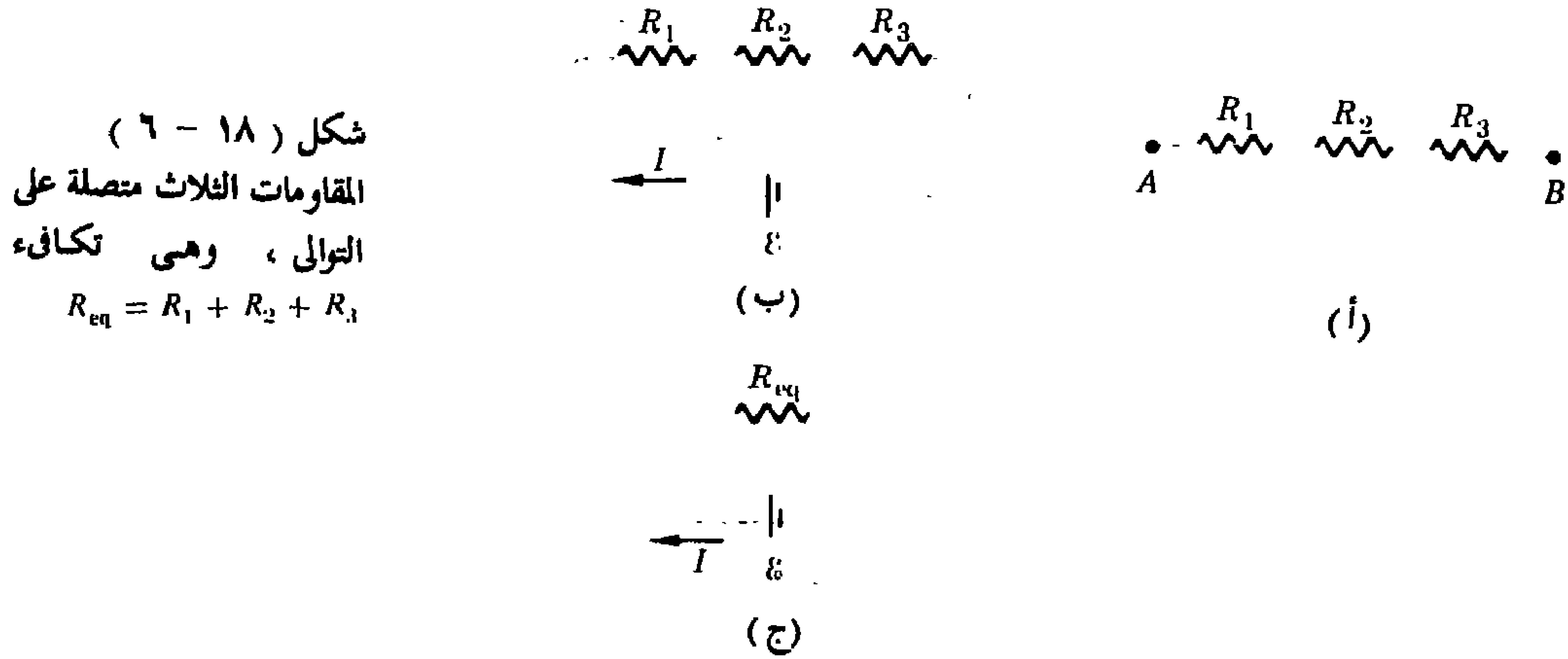
بالتعويض فاننا نجد ، بوحدات الأمبير ampere

$$I_1 - 0.50 = 1.25$$

لاحظ اننا نحمل الاشارات الصحيحة لكل من I_2 و I_3 وبحل هذه المعادلات نجد أن $I_1 = 1.75\ A$

١٨ - ٣ المقاومات على التوالى وعلى التوازى

هناك طريقتان لترتيب المقاومات فى الدوائر الكهربائية يمكن تبسيطهما بسهولة . واذا ماعرفناهما سيقل العبء كثيرا عند حل أية مسألة . يبين الشكل (١٨ - ٦أ) أول هذه الطرق فى الترتيب .



شكل (١٨ - ٦)
المقاومات الثلاث متصلة على التوالى ، وهى تكافىء $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

المقاومات على التوالى

فالمقاومات بهذه الطريقة يقال انها على التوالى . وللانتقال من النقطة A الى النقطة B لايوجد الا مسار واحد وهذا المسار يمر خلال جميع المقاومات .

لو وصلنا هذه المجموعة عبر بطارية كما فى الجزء (ب) فلنا أن نخمن أنها ستعمل كما لو كانت مقاوما واحدا يساوى المجموع $R_1 + R_2 + R_3$ وفيما يلى سنثبت أن هذا التخمين صحيح ، أما مانرجوه الآن فهو أن نجد المقاوم المكافىء R_{eq} فى الجزء جـ من الشكل والذى يقوم بسحب نفس التيار الذى تسحبه المجموعة فى الجزء ب . ولهذا سنقوم بالاستفادة من قاعدة العروة للدوائر المرسومة فى الأجزاء ب ، جـ .

اذا درنا فى اتجاه عقربى الساعة حول الدائرة فى الجزء ب فاننا نحصل على معادلة العروة الآتية :

$$+\mathcal{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0$$

وهذه يمكن كتابتها على الصورة الآتية :

$$\frac{\mathcal{E}}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

بكتابة معادلة عروة مشابهة بالنسبة للجزء جـ فان :

$$+\mathcal{E} - IR_{eq} = 0$$

ومنها

$$\frac{\mathcal{E}}{I} = R_{eq}$$

من المعادلتين نرى أن :

على التوالى $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$ (١٨ - ١)

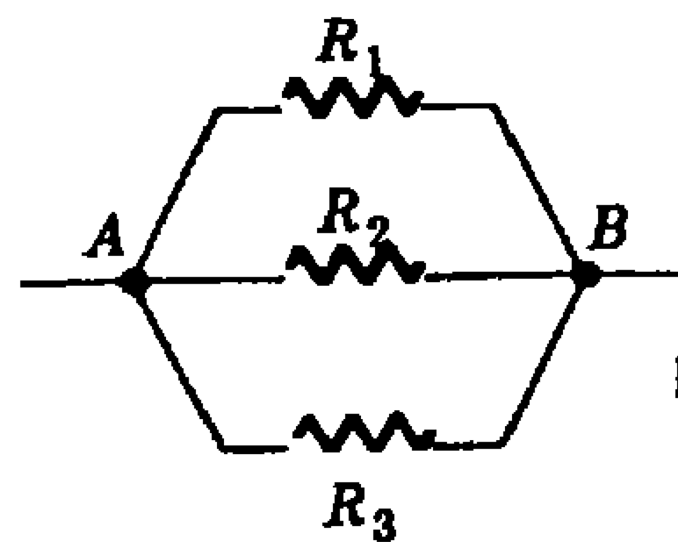
وعلى العموم يمكن القول بأن :

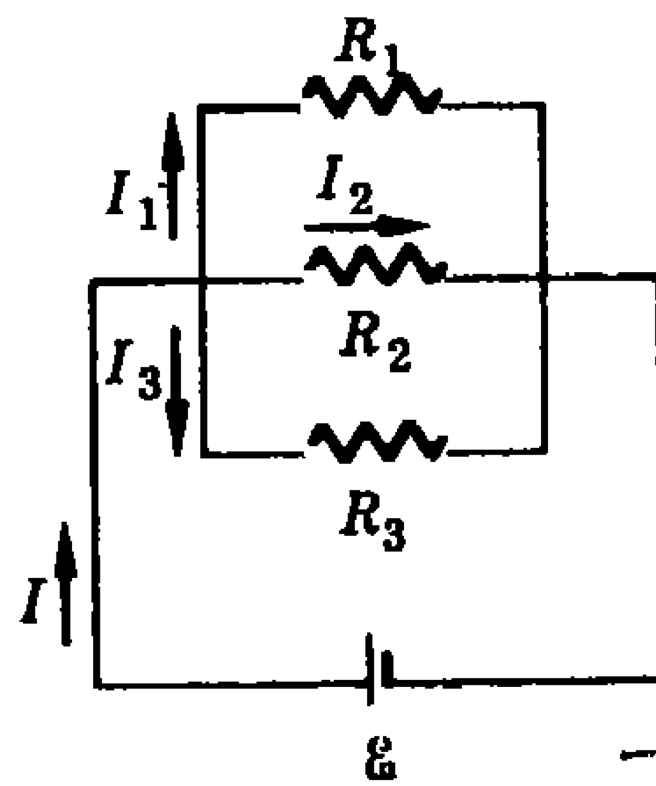
مقاومة القوة المكافئة

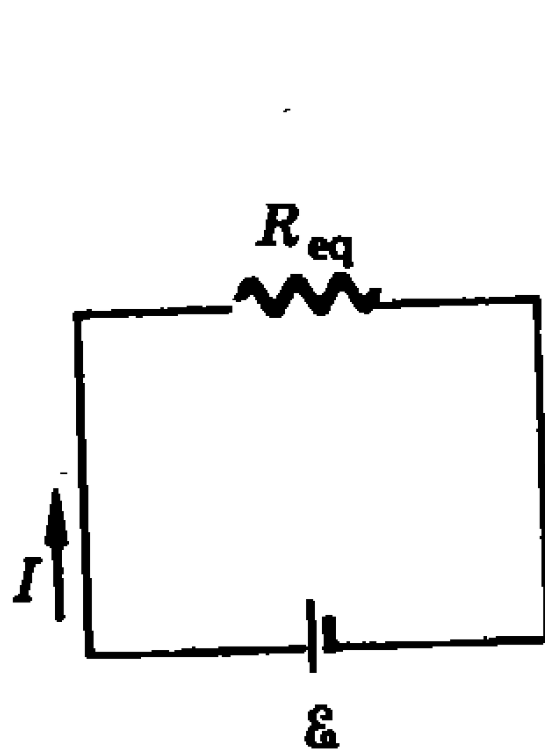
اذا كانت هناك مجموعة من المقاومات متصلة على التوالى فانها تكافىء مقاوما واحدا يساوى مجموعها

المقاومات على التوازى

هناك طريقة أخرى شائعة لترتيب المقاومات مبينة فى الشكل (١٨ - ٧أ) . يقال أن هذه المقاومات على التوازى ، وفى هذه الطريقة تتصل نهاية كل مقاوم بالنقطة A وتتصل النهاية الثانية لكل مقاوم بالنقطة B . وحين يكون هناك فرق للجهد عبر المجموعة ، كما فى الجزء ب من الشكل ، فان نفس فرق الجهد يكون عبر كل مقاوم . نود الآن أن نجد المقاوم المكافىء R_{eq} والموضح فى الجزء جـ والذى يمكن أن يحل محل المجموعة ويظل يسحب نفس التيار .







شكـــل (١٨ - ٧) المقاومات الثلاث على التوازى . والمكافىء لها يعطى بالمعادلة $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$.

نلاحظ فى الشكل ١٨ – ٧ب أن فرق الجهد عبر كل مقاوم هو $\mathcal{E}$ ومن قانون أوم نجد أن

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1} \qquad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} \qquad I_3 = \frac{\mathcal{E}}{R_3}$$

ولكن قاعدة النقطة تفيد بأن

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

ولذا فان

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1} + \frac{\mathcal{E}}{R_2} + \frac{\mathcal{E}}{R_3}$$

وبعد اعادة ترتيب الحدود تصبح ،

$$\frac{I}{\mathcal{E}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

والآن لننظر للدائرة المرسومة فى الجزء (ج) . تفيد قاعدة العروة بأن

$$+\mathcal{E} - IR_{eq} = 0$$

ومنها

$$\frac{I}{\mathcal{E}} = \frac{1}{R_{eq}}$$

يمكننا الآن مساواة المعادلتين اللتين تحتويان على $I/\mathcal{E}$ لنجد :

على التوازى $$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \qquad (١٨ - ٢)$$

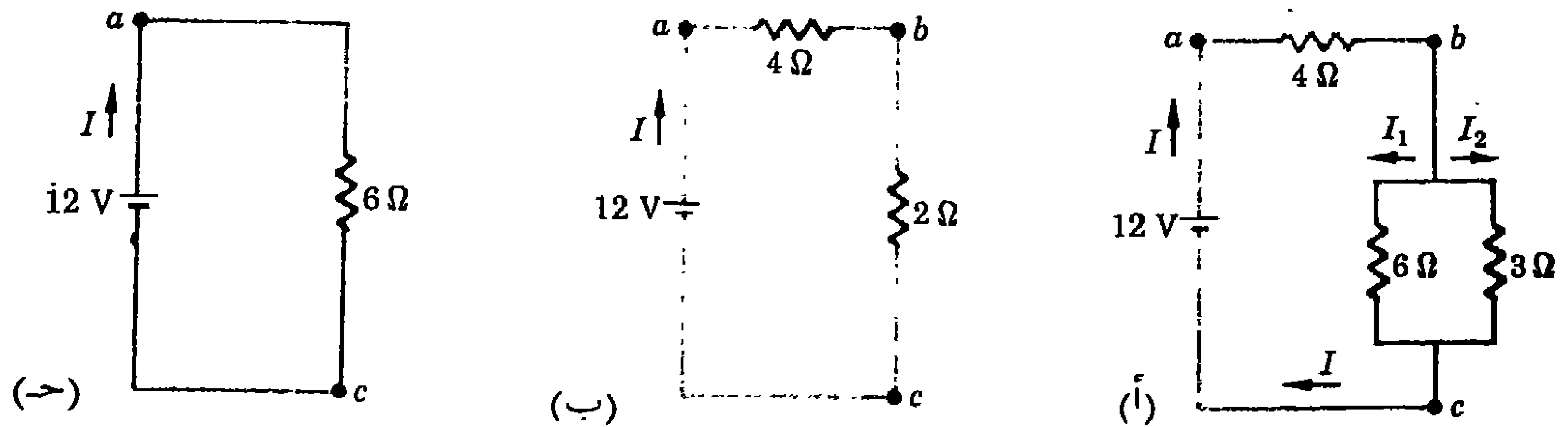
وعلى العموم يمكن القول بأن :

مقاومة التوازى المكافئة

اذا كانت هناك مجموعة من المقاومات متصلة على التوازى فان مقلوب مقاومتها المكافئة يساوى مجموع مقلوبات هذه المقاومات

فلنقم الآن بعمل عدة أمثلة تدريبية لنرى بوضوح أكثر كيف يمكن الحصول على هذه المقاومات المكافئة والافادة منها .

مثال توضيحى ١٨ – ٣ : اوجد التيار الذى يسرى من البطارية فى الشكل ١٨ – ٨أ .



شكل ١٨ – ٨
المقاومة المتصلة على التوازى بين b و c تكافىء $2\,\Omega$ كما هو موضح فى الجزء ب المقاومات التى على التوالى فى (ب) يمكن أن تضم معا كما فى (جـ)

طريقة الحل : كان من الممكن أن تحل هذه المسألة باستخدام قاعدتى كيرتشوف ، الا أنه من الابسط عادة أن تدمج المقاومات التى على التوالى وعلى التوازى قبل كتابة معادلات العروة . ويمكن خفض المقاومات الموضحة فى الاجزاء (ب) ، (جـ) من الشكل . ولنقم أولا بدمج المقاومين اللذين على التوازى بين النقطتين b ، c فيكون لدينا :

$$\frac{1}{R_{bc}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} = \frac{3}{6}$$

أو

$$R_{bc} = 2\,\Omega$$

نقوم الآن برسم دائرة مكافئة كما فى الشكل ١٨ – ٨ب . المجموعة المتوازية حل محلها مقاومة مكافئة . ونشاهد المقاوم $4\,\Omega$ والمقاوم $2\text{-}\Omega$ وقد اتصلا على التوالى بين النقطتين a ، c ويكون المكافىء لهما هو

$$R_{ac} = 4 + 2 = 6\,\Omega$$

نقوم الآن برسم دائرة مكافئة جديدة كما فى الجزء (جـ) ، حيث يمكننا بسهولة تطبيق قانون أوم . يبلغ فرق الجهد عبر المقاوم $6\text{-}\Omega$ ماقيمته 12V وعليه يكون لدينا

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12\text{ V}}{6\,\Omega} = 2\text{ A}$$

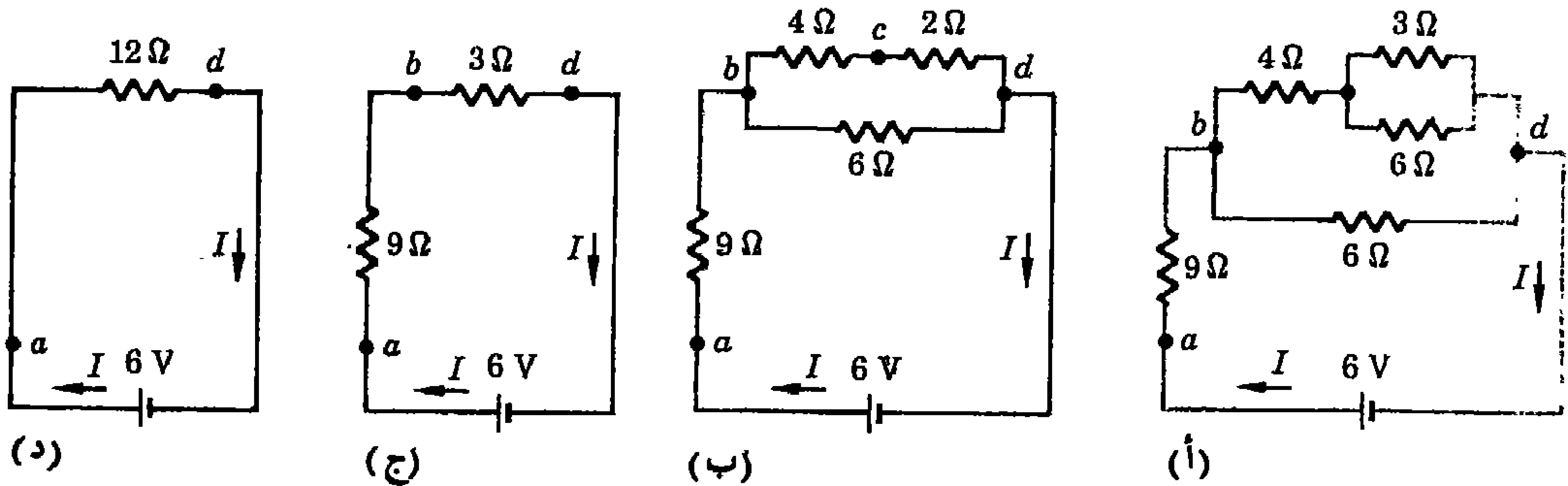
وهى النتيجة المطلوبة .

مثال توضيحى ١٨ – ٤ : اوجد التيار الذى يسرى من البطارية فى الشكل (١٨ – ٩أ) .

طريقة الحل : لدينا هنا أيضا مقاومان متوازيان وهما 3-Ω و 6-Ω ويمكن ابدالهما بالمقاوم 2-Ω كما فى الجزء ب . حيث يكون المقاومان 2-Ω ، 4-Ω على التوالى بحيث يكون مكافئهما هو المقاوم 6-Ω ،ولكن هذا المقاوم المكافىء يكون على التوازى مع المقاوم 6-Ω : باستخدام معادلة المقلوبات نجد أن المقاومين 6 المتصلين على التوازى يكافئان مقاوما قدره 3-Ω كما هو موضح فى الجزء (جـ) . وفى النهاية يمكن اختصار الدائرة الى الشكل الموضح فى الجزء (د) . وباستخدام قانون أوم ، يصبح لدينا :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6\ \mathrm{V}}{12\ \Omega} = 0.50\ \mathrm{A}$$

شكل ١٨ – ٩
الدائرة المركبة فى (أ) يمكن اختصارها الى دائرة مكافئة بسيطة كما فى (د)

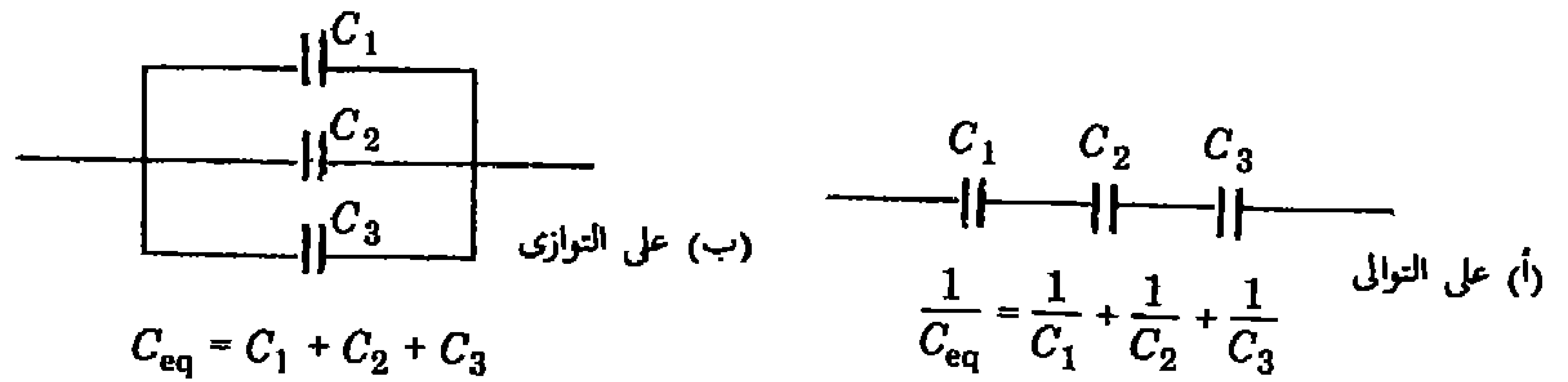


١٨ – ٤ المكثفات على التوالى وعلى التوازى

السعة المكافئة

لن نقوم بفحص هذا الموقف بالتفصيل . وبدلا من هذا نعرض طريقتين لترتيب المكثفات فى الشكل (١٨ – ١٠ أ) ، ب حيث ترى النتائج الخاصة بالمكثفات المكافئة فى كل حالة . وسنحصل على هذه النتائج من خلال المسائل الواردة فى نهاية هذا الفصل . لاحظ أن العلاقات هى بالضبط عكس العلاقات التى أوجدناها للمقاومات المكافئة . تضاف المكثفات المتوازية مباشرة بينما تضاف مقلوباتها حين تكون المكثفات على التوالى

شكل (١٨ – ١٠)
اختصار المكثفات التى على التوالى وعلى التوازى



١٨ – ٥ حل مسائل الدائرة

أصبح لدينا الآن الأدوات المطلوبة لحل معظم مسائل دوائر التيار المستمر (dc) . وقبل أن نقدم على استعمالها دعنا نذكر بعض الحقائق التى يجب تذكرها

أثناء التطبيق . وعلى الرغم من أن كل مسألة لها ظروفها الخاصة الا أن الاسلوب التالى يكون دائما مفيدا .

٢ – ارسم الدائرة .

٢ – عين تيارا واتجاها محددا لكل سلك هام . كن حريصا على استعمال رمز واحد للتيار الذى يمر فى سلك معين حتى لو كان هذا السلك يحتوى على عدة عناصر . اذا خرج سلك فرعى من السلك الرئيسى فان التيارات على الجانبين يجب عادة اعتبارها مختلفة .

٣ – اختصر مجموعات المقاومات التى على التوالى وعلى التوازى كلما أمكن ذلك .

٤ – اكتب معادلات العروة للدوائر المتبقية متذكرا انه مالم تحتو المعادلة على معلومات جديدة عن تغيرات الجهد فانها تكون زائدة عن الحاجة .

٥ – اكتب معادلات النقطة بالنسبة لنقط الاتصال ومالم يكون هناك تيار جديد فى معادلة ما فان هذه المعادلة تصبح زائدة عن الحاجة .

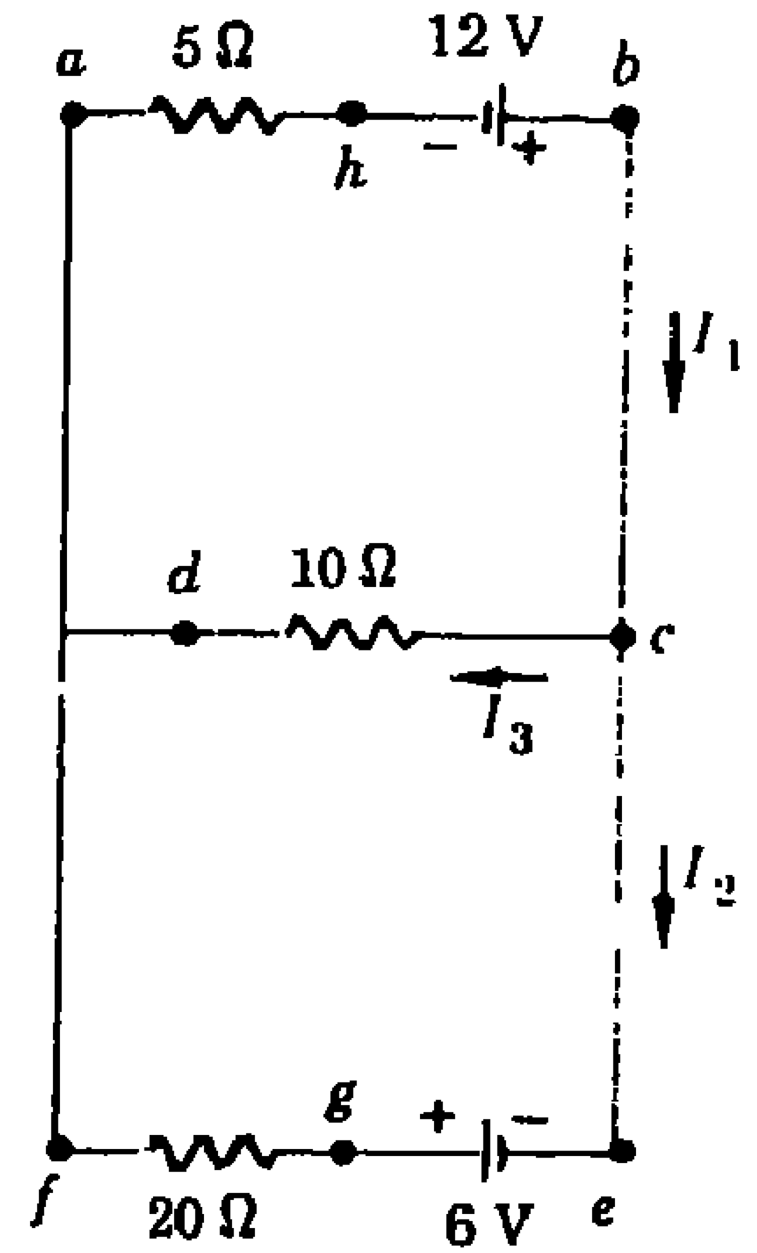
٦ – حل هذه المعادلات سعيا وراء الكميات المجهولة .

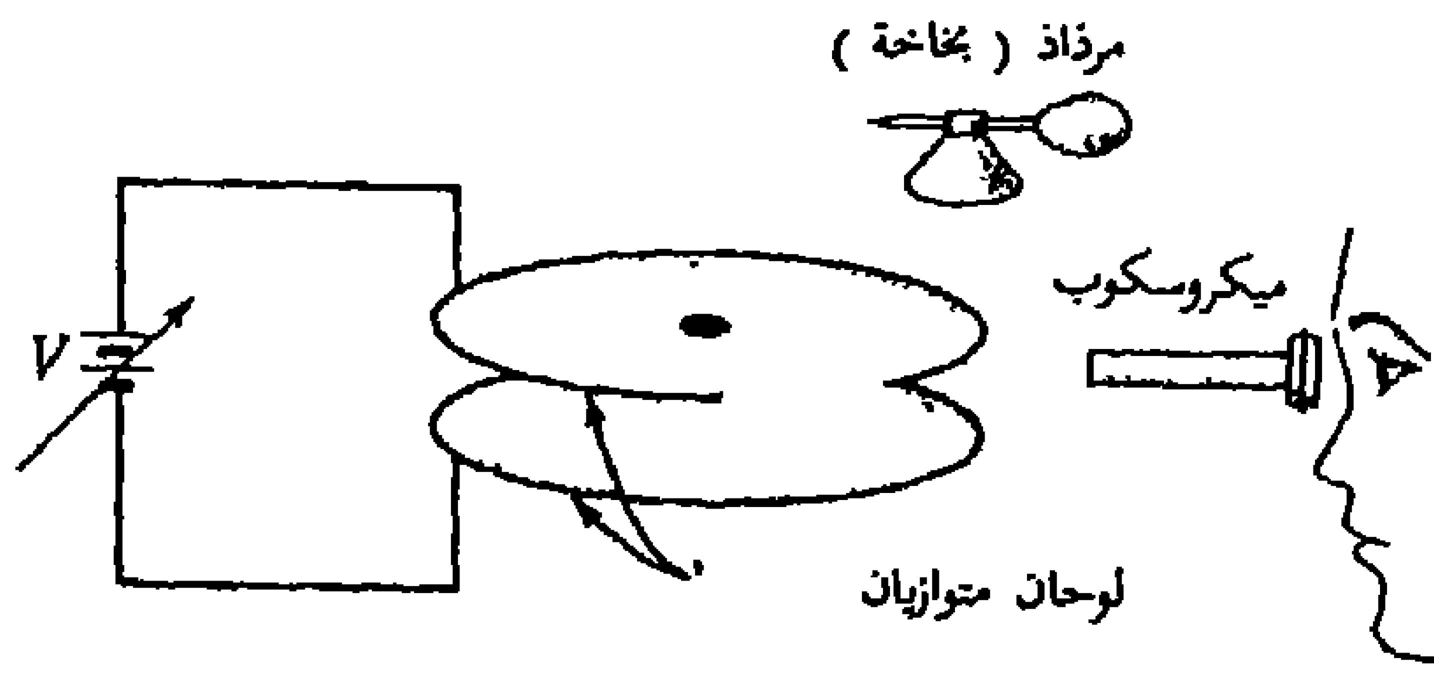
ولنقم الآن بدراسة الأمثلة

مثال توضيحى ١٨ – ٥ : اوجد التيارات الموجودة فى أسلاك الدائرة الموضحة فى الشكل (١٨ – ١١)

طريقة الحل : الخطوتان ١ ، ٢ المذكورتان فى الطريقة السابقة مكتملتان فى الشكل . فليس هناك مجموعة بسيطة من المقاومات (المقاومات فى ab و ef ليست على التوازى مع المقاومة الوسطى لأن الاطراف الى اليمين منهما متصلة ببطاريات وليست بينهما نقط مشتركة) .

شكل (١٨ – ١١)
دائرة يمكن حلها بسهولة بواسطة قاعدتى كيرتشوف





تجربة قطرة الزيت لميليكان

تمكن ر .أ . ميليكان ومساعدوه (١٩٠٩ – ١٩١٣) من قياس كَم الشحنة أو شحنة الالكترون e لأول مرة بدقة . وقد كانت تجربة ميليكان من البساطة والمباشرة بحيث اثبتت دون أدنى شك أن الشحنة مكماة . ويوضح الشكل تخطيطا للجهاز المستخدم .

يتكون الجهاز أساسا من لوحين معدنيين متوازيين (بينهما مسافة ≈ 1 mm ومساحة سطح كل منهما ≈ 100 cm^2) . بينهما فرق للجهد معروف ويمكن تغيير قيمته . يقوم فرق الجهد V هذا بانشاء مجال كهربى $E = V/d$ بين اللوحين ، حيث d هى المسافة بين اللوحين . اذا ماوجدت قطرة زيت مشحونة (ذات كتلة m وشحنة q) نفسها بين اللوحين فان قوة رأسية سوف تؤثر عليها . بضبط قيمة فرق الجهد بين اللوحين يمكن جعل هذه القوة الرأسية مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه لقوة الجاذبية mg على القطرة . وحين يتم هذا تكون محصلة القوى على القطرة صفرا وتبقى بلا حركة . وعندها ،

$$mg = Eq$$

ومنها

$$q = \frac{mg}{E}$$

عندما يكون المجال الكهربائى E وكتلة القطرة m وكذا عجلة الجاذبية g معروفين ، فان الشحنة q التى على القطرة يمكن تعيينها .

قام ميليكان – من الناحية العملية – بالسماح لقطرات دقيقة جدا من الزيت بالتناثر من مرذاذ (بخاخة) لكى تهبط من فتحة صغيرة فى اللوح المعدنى الأعلى . يحتوى عدد كبير من هذه القطرات على شحنات كهربية فائضة ، تكونت نتيجة لاحتكاك القطرات ببعضها البعض أثناء خروجها من المرذاذ . يسلط ضوء قوى على القطرات أثناء نزولها بين اللوحين مما يجعلها تتلألأ ويمكن رؤيتها بسهولة خلال المجهر . وقد أمكن أيضا تغيير الشحنة على القطرات وذلك بتعريض المنطقة الكائنة بين اللوحين لشعاع ضعيف من أشعة -X كلما دعت الحاجة الى ذلك .

حسب المجال الكهربائى بين اللوحين عن طريق قياس المسافة بين اللوحين d وفرق الجهد V بين اللوحين . ولايجاد كتلة قطرة من الزيت m قام ميليكان بقياس الزمن الذى تستغرقه القطرة فى الهبوط مسافة معينة خلال الهواء فى حالة عدم وجود مجال كهربى . ولما كانت القطرات تتحرك بسرعة ثابتة – هى السرعة النهائية لها – خلال المسافة المحددة ، فان قوة الجاذبية mg تساوى قوة اللزوجة والاحتكاك بين القطرة والهواء . اذا مااعتبرنا أن قوة اللزوجة تتناسب طرديا مع سرعة القطرة v فان يمكن كتابة الآتى :

$$mg \propto v$$

وقد كان أحد المصادر الأساسية للخطأ فى التجربة مرتبطا بثابت التناسب فى هذه العلاقة . على أنه يمكن وبدقة معقولة – استعمال مايسمى بقانون ستكوكس Stokes' law لايجاد قوة اللزوجة وكتابة مايلى

$$mg = 6\pi\eta a v$$

حيث η هى لزوجة الهواء ، a نصف قطر القطرة . وحيث أن نصف القطر مرتبط بكتلة القطرة من خلال حقيقة أن كثافة الزيت ρ مضروبة فى حجم القطرة تساوى كتلة القطرة

$$m = \tfrac{4}{3}\pi a^3 \rho$$

ويمكن ايجاد كتلة القطرة عن طريق معرفة ρ ، η والسرعة النهائية v

وكما نرى ، اذا عرفت m ، E فان شحنة القطرة يمكن ايجادها ، وقد أجرى ميليكان آلافا من التجارب ذات الطابع العام (وقد عدلت قليلا للحصول على دقة أعلى) . وكانت نتائج قيم q دائما مضاعفات صحيحة للكمية 1.6×10^{-19}C فاستنتج أن الشحنة مكماه وأن مقدار كم الشحنة هو 1.6×10^{-19}C التى يرمز لها بالرمز e . وجد أن كل الشحنات فى الطبيعة هى مضاعفات صحيحة لهذه الكمية . وعلى وجه الخصوص فان شحنة الالكترون هى $-e$ أما شحنة البروتون $+e$ والقيمة المعتمدة حاليا للشحنة e هى 1.6022×10^{-19}

لنبدأ من النقطة a ونكتب معادلة العروة $abcda$ وهى معبر عنها بوحدات volts كالاتى :

$$-5I_1 + 12 - 10I_3 = 0 \quad (١)$$

وبالمثل بالنسبة للعروة $dcefd$

$$+10I_3 + 6 - 20I_2 = 0 \quad (٢)$$

لدينا ثلاث كميات مجهولة I_1 ، I_2 ، I_3 أما المعادلات فاثنتان فقط ، ومعادلة العروة $abcefa$ لاتتضمن أية تغيرات جديدة فى الجهد لذا نتجاهلها .

للحصول على معادلة ثالثة فاننا نكتب معادلة النقطة c ، وهى :

$$I_1 = I_3 + I_2 \quad (٣)$$

بالتعويض عن هذه القيمة I_1 فى المعادلة (١) نحصل على

$$-5I_3 - 5I_2 + 12 - 10I_3 = 0$$

التى تختصر الى :

$$-5I_2 - 15I_3 + 12 = 0 \quad (٤)$$

ونستطيع الآن حل المعادلتين (٢) و (٤) آنيا .
بحل المعادلة (٢) للحصول على I_3 نجد أن

$$I_3 = 2I_2 - 0.60 \qquad (٥)$$

بالتعويض منها فى (٤) نجد أن

$$-5I_2 - 30I_2 + 9 + 12 = 0 \qquad (٥)$$

ومنها

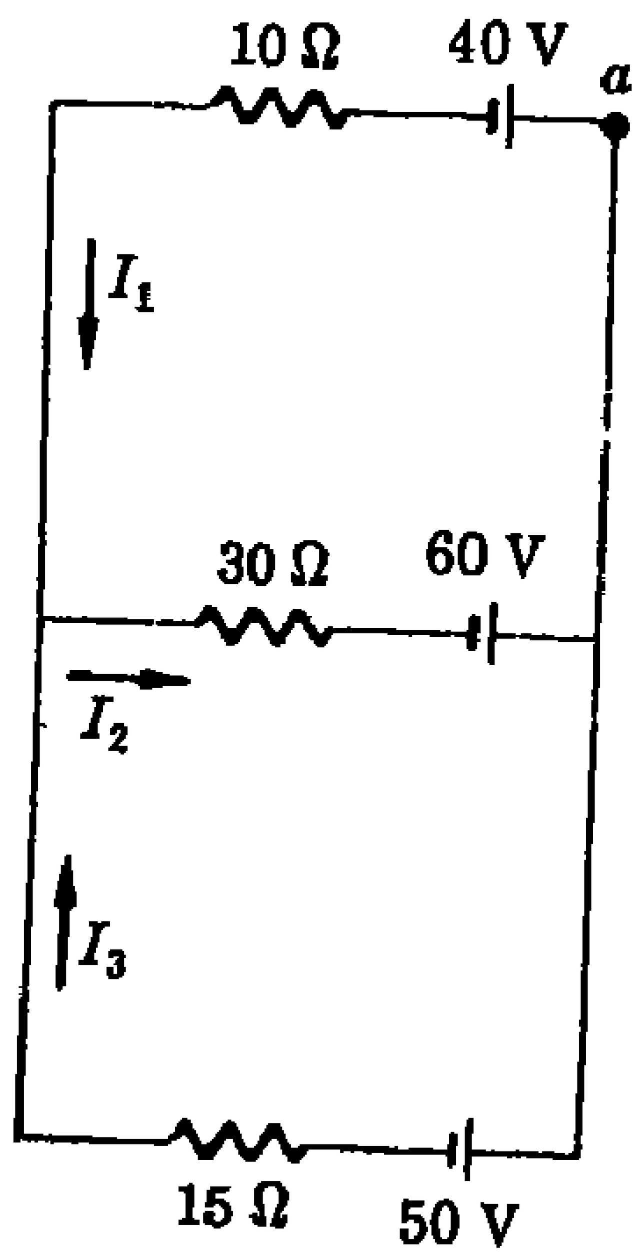
$$I_2 = 0.60\ \text{A}$$

وباستخدام هذه الكمية فى (٥) نجد

$$I_3 = 0.60\ \text{A} \qquad (٦)$$

والآن باستخدام (٣) نجد أن

$$I_1 = 1.20\ \text{A}$$



شكل (١٨ - ١٢)
اوجد التيارات الثلاثة المجهولة

مثال توضيحى ١٨ - ٦ : للدائرة الموضحة فى الشكل (١٨ - ١٢) اوجد I_1 ، I_2 ، I_3 ،

طريقة الحل : سنختار التيارات بحيث تسرى فى الاتجاهات المبينة فى الشكل مع ملاحظة أن $I_1 + I_3 = I_2$ ومن ثم تستطيع كتابة معادلات الدائرة او العروة . ستأخذ العروة التى تتضمن البطاريتين 60V ، 40V ومن النقطة a ننطلق فى اتجاه ضد حركة عقربى الساعة ،

$$-40 - 10I_1 - 30I_2 + 60 = 0 \quad \text{أو} \quad I_1 + 3I_2 = 2$$

ثم من النقطة a خلال البطاريتين 5oV ، 4OV نجد أن

$$-40 - 10I_1 + 15(I_2 - I_1) + 50 = 0$$

أو

$$2.5I_1 - 1.5I_2 = 1.0$$

بضرب المعادلة الثانية فى 2 وجمعها على الاولى فان ،

$$6I_1 = 4 \quad \text{أو} \quad I_1 = \tfrac{2}{3}\ \text{A}$$

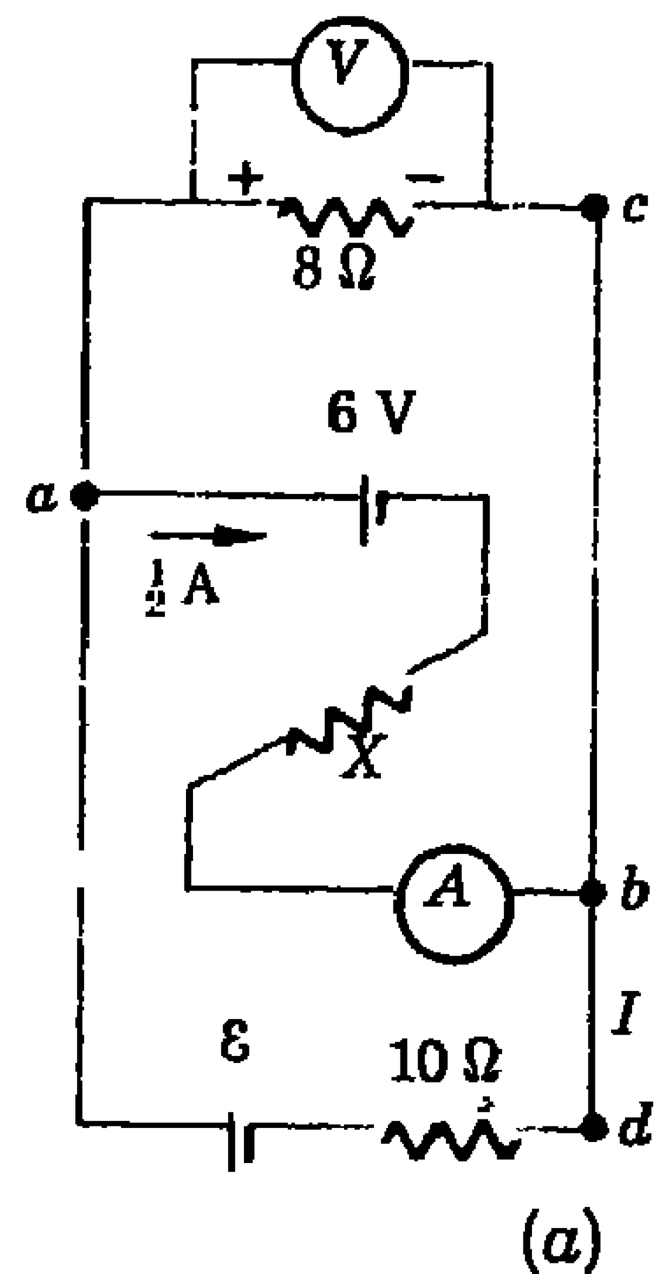
باستخدام هذه القيم فى المعادلة الأولى نجد

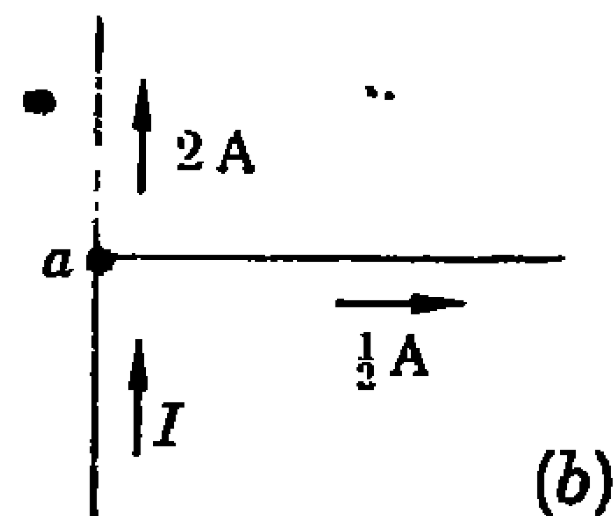
$$3I_2 = \tfrac{4}{3} \quad \text{أو} \quad I_2 = \tfrac{4}{9}\ \text{A}$$

وحيث أن $I_3 = I_2 - I_1$ فان ،

$$I_3 = -\tfrac{2}{9}\,\mathrm{A}$$

من الواضح أن I_3 تسرى فى اتجاه عكس ماهو مرسوم فى الشكل





شكل (١٨ – ١٣)
قراءات الأميتر والفولتميتر معلومتان ونود ايجاد I ، X ، ε

مثال توضيحى ١٨ – ٧ : اوجد قيم ε، X ، I فى الشكل (١٨ – ١٣) . يقرأ الأميتر 0.50A أما الفولتميتر فيقرأ 16V ، ومن طريقة توصيل كل من الأميتر والفولتميتر يعرف أن قطبية المقاوم هى كما بالشكل وأن التيار يسرى فى الفرع المركزى (الأوسط) فى الاتجاه المبين بالشكل .

طريقة الحل : حيث أن الفولتميتر يقرأ 16V عبر المقاوم 8-Ω فان قانون أوم يفيد بأن التيار المار فى السلك العلوى هو 2A . ومن قطبية المقاوم الموجود بأعلى الدائرة نرى أن التيار ينتقل الى اليمين خلال السلك .

التيارات عند النقطة a من الدائرة يجب أن تكون كما هو مبين فى الشكل (١٨ – ١٣ ب) . حسب قاعدة النقطة .

$$I = 2 + 0.50$$

ولذا فان

$$I = 2.5\ \mathrm{A}$$

وبكتابة معادلة الدائرة للعرور $abca$ وتذكر أن مقاومة الأميتر الجيد مهملة ، أى أن فرق الجهد عبره صفر فاننا نجد ،

$$-6 - \tfrac{1}{2}X + 16 = 0$$

ومنها

$$X = 20\,\Omega$$

أما معادلة الدائرة للعروة $acbda$ فتعطى

$$-16 - 25 + \varepsilon = 0$$

أو

$$\varepsilon = 41\ \mathrm{V}$$

مثال توضيحى ١٨ – ٨ : اوجد التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 وكذا الشحنة على المكثف للدائرة المبينة فى شكل (١٨ – ١٤) .

طريقة الحل : نلاحظ أولا أنه لايمر أى تيار فى السلك fg وذلك لأن المكثف مشحون وعلى هذا يكون $I_4 = 0$ وعلينا فقط أن نهمل هذا السلك عند حل بقية الدائرة عند النقطة d نجد أن

$$I_2 = I_1 + I_3$$

بكتابة معادلة العروة $dcbed$

$$-12 + 6I_1 = 0$$

أو

$$I_1 = 2\text{ A}$$

وباستعمال العروة $dabcd$ فان

$$+4 - 8I_3 + 12 = 0$$

أو

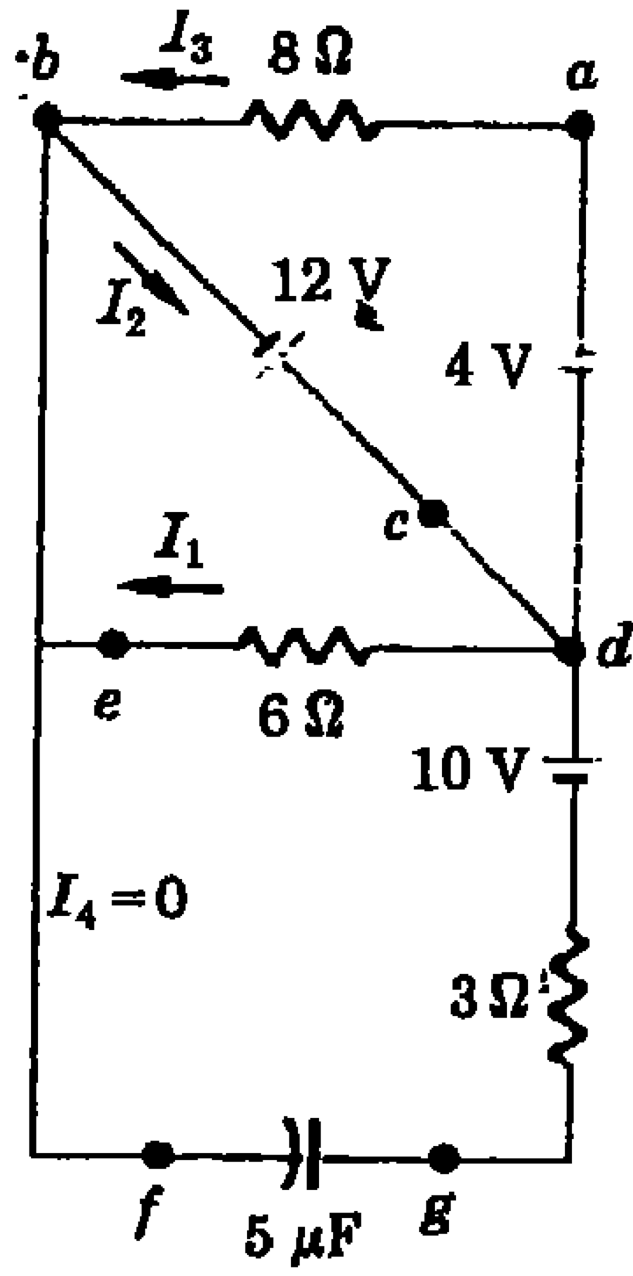
$$I_3 = 2\text{ A}$$

و

$$I_2 = I_1 + I_3 = 4\text{ A}$$

اذا عرفنا قيمة فرق الجهد بين النقطتين f ، g فاننا نستطيع استعمال المعادلة $Q = CV_{fg}$ لايجاد Q . ويمكننا بسهولة ايجاد V_{fg} وذلك بالبدء من النقطة g والحركة حول الدائرة $gdefg$ مع جمع ارتفاعات وانخفاضات الجهد ، ويؤدى هذا الى

$$0 + 10 - 6I_1 + V_{fg} = 0$$
$$V_{fg} = -10 + 12 = +2\text{ V}$$



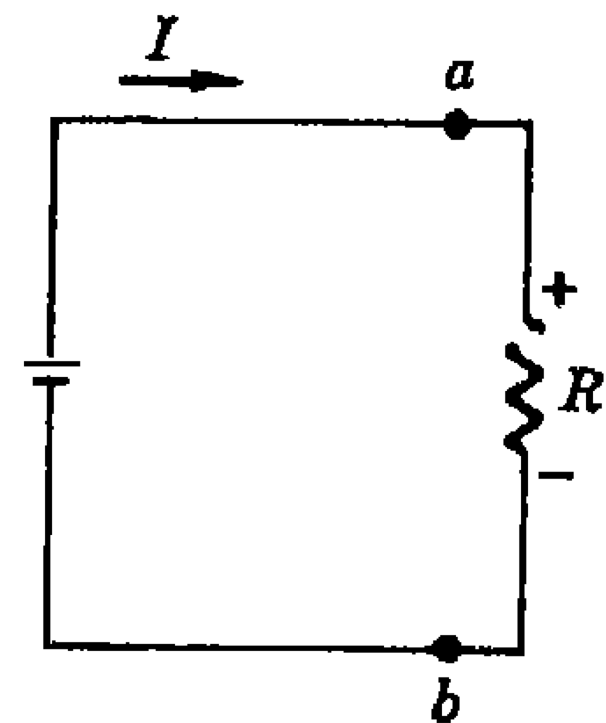
شكل (١٨ - ١٤)
حين تكتمل شحنة المكثف يكون التيار خلال السلك الموجود فى قاع الدائرة صفرا ويمكن عندها اهمال ذلك الجزء من الدائرة

تدل الاشارة الموجبة الى أننا ارتقينا فى الجهد بانتقالنا من f الى g ولذا فان جهة g من المكثف هى الموجبة . ولدينا الآن بالنسبة لشحنة المكثف .

$$Q = CV_{fg} = (5 \times 10^{-6})(2) = 1 \times 10^{-5}\text{ C}$$

١٨ - ٦ القدرة والتسخين الكهربائى

حين تسبب البطارية مرور التيار فى مقاوم كما فى شكل ١٨ - ١٥ فان البطارية تمد الدائرة بالطاقة . تقوم البطارية برفع الشحنات بشكل دائم الى مرتقى الجهد خلال فرق الجهد V وهو جهد البطارية.



شكل (١٨ - ١٥)
تظهر الطاقة التى فقدتها البطارية على هيئة حرارة فى المقاوم

نعلم ان الشغل المبذول فى حمل شحنة ما q خلال فرق جهد V يعطى بالمعادلة :

الشغل المبذول = qV

فاذا نقلت الشحنة فى زمن مقداره t فان الشغل المبذول فى الثانية هو

$$\text{الشغل/ ث} = \frac{qV}{t}$$

ولكن الشغل المبذول فى الثانية هو القدرة ، لذا يصبح لدينا

$$\text{القدرة} = V\frac{q}{t}$$

ولكن التيار معرف على انه الشحنة المنقولة فى الثانية ، أى q/t ، وعليه فاننا نجد أن القدرة التى أمدتها البطارية هى .

$$\text{القدرة} = VI \qquad (١٨ - ٣)$$

هذه هى العلاقة للقدرة الناتجة من مصدر للتيار I يعمل عند جهد مقداره V فى الحالة الراهنة تستهلك الطاقة الناتجة من البطارية داخل المقاوم ويمكن استخدام نفس التحليل العام السابق لبيان أن المعادلة (١٨ – ٣) هى أيضا تعبير عن القدرة المستهلكة فى أى عنصر يمر خلاله تيار I اذا كان فرق الجهد بين طرفيه هو V . فى حالة المقاوم ، فان تطبيق قانون أوم يؤدى الى صورة أخرى من المعادلة :

$$\text{للمقاوم} \quad P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R} \qquad (١٨ - ٤)$$

وحيث أن وحدة Volt هى عبارة عن Joules / coulomb وان التيار هو Coulomb / sec فان وحدات القدرة فى هذه المعادلة تصبح Joules/sec أو Watt (وات) .

كلنا يعلم الحقيقة القائلة بأنه إذا مر تيار خلال مقاوم ما فانه يحدث تسخينا فى سلك المقاومة ، فالتيار المار فى فتيلة مصباح توهج عادى يقوم بتسخين عنصر المقاومة الى درجة الإبيضاض . والافران الكهربائية بها عنصر مقاومة هو بمثابة وحدة التسخين كما فى محمصة الخبز الكهربائية ، مكواة الثياب ، مجفف الملابس الكهربائى وكثير من أدوات التسخين الأخرى . والطاقة الكهربائيه المستهلكة هى التى تقوم بامداد الطاقة الحرارية للمقاوم . يقوم المقاوم بتحويل الطاقة الكهربائية التى تمده بها البطارية الى طاقة حرارية . ويسمح لنا هذا التبادل بين الطاقة الكهربائية والحرارية أن نعين المكافىء الميكانيكى للحرارة بطريقة تختلف عما ناقشناه فى الفصل الحادى عشر . فنحن هنا نحتاج فقط الى قياس كمية الحرارة التى ينتجها مقاوم R يحمل تيارا I . ومن السهل عمل هذا إذا وضع سلك المقاومة فى مسعر به ماء . الطاقة الكهربائية التى

يحصل عليها الماء والمسعر فى زمن قدره t هى بالضبط Pt أو I^2Rt ويعبر عنها بالجول Joules . أما الطاقة الحرارية بالسعر Calorie فتوجد من ارتفاع درجة الحرارة للمسعر ومحتوياته . ومن ثم ، حيث أن مقادير الطاقة يجب أن تكون متساوية بدلالة أى من الوحدات Calorie أو Joules فإن معامل التحويل بينهما يصبح من السهل ايجاده . من الطبيعى أن تكون العلاقة بين الواحدات هى نفسها كما أوجدناها من قبل من دوران عجلة التجديف فى الماء أو

$$1 \text{ Cal} = 4.184 \text{ J.}$$

مثال توضيحى ١٨ – ٩ : مامقدار الحرارة بالسعر (Calorie) التى يمكن أن يولدها مصباح اضاءة شدته 40w فى 20 min .

طريقة الحل : يولد مصباح الاضاءة 40w حرارة مقدارها 40 J كل ثانية ومن ثم فانه فى S (60) (20) ينتج ،

$$\text{حرارة} = [(20)(60)](40) = 11{,}500 \text{ cal} = 48{,}000 \text{ J} = 11.5 \text{ kcal}$$

مثال توضيحى ١٨ – ١٠ : إذا كانت الطاقة الكهربائية تكلف l0 cent لكل Kilowatt hour فما هى تكلفة ادارة مجفف قدرته 700w لمدة 30 min ؟

طريقة الحل : كل Kilowatt hour (KWh) هو عبارة عن وحدة الطاقة التى يحصل عليها الانسان اذا كانت القدرة تقاس بوحدات Kilowatts ويقاس الزمن بالساعات hours وعليه فان :

$$\text{الطاقة} = \text{(القدرة)}\ \text{(الزمن)} = (0.700)(0.50) \text{ kWh} = 0.350 \text{ kWh}$$

وتكون التكلفة 3.5 cents .

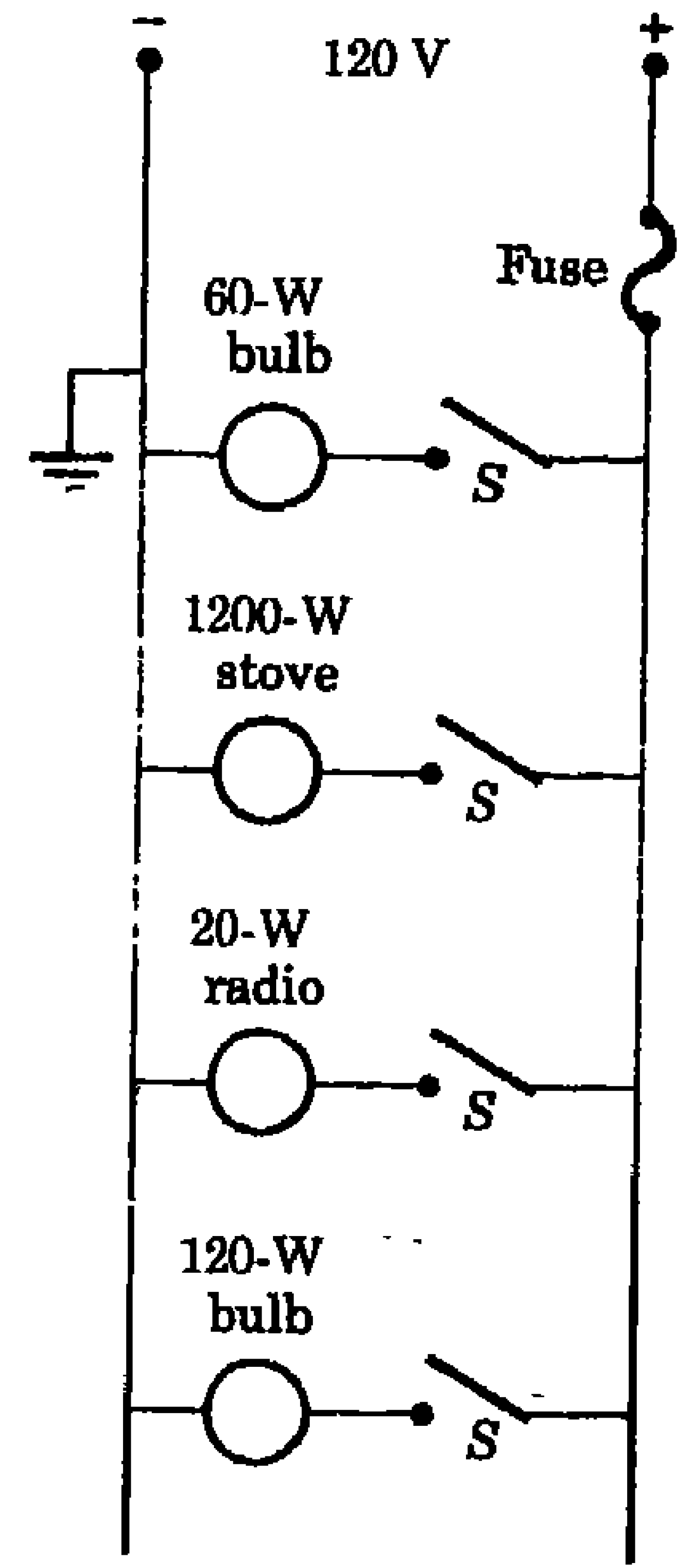
١٨ – ٧ الدوائر المنزلية

تعتبر الدوائر الكهربائية العادية التى تمتد داخل منازلنا مألوفة لنا جميعا . فشركات الكهرباء تمد على الأقل سلكين الى كل منزل تمده بفرق جهد مقداره 120 V تقريبا . وعادة مايكون لهذه الاسلاك الواصلة الى المنازل قطر كبير حتى يمكنها أن تحمل تيارا كبيرا دون أن يحدث بها تسخين (كلما كبرت مساحة مقطع السلك ، كلما قلت المقاومة . ولما كانت الحرارة المتولدة تتناسب مع I^2R لذا فالمقاومة المنخفضة تتيح تبديدا أقل للحرارة) .

تقوم الأسلاك فى المنازل الحديثة بحمل تيار يصل الى 20 A تقريبا دون حرارة مفرطة . على أنه للوقاية من التيارات الكبيرة فان مصهرا او قاطع دائرة يوصل على التوالى مع السلك ويكون الغرض منة فصل السلك عن مصدر الجهد اذا سحب تيار

أكبر من المسموح به . وتقوم هذه العملية تلقائيا بفصل أى سلك يمر فيه تيار أكبر من القدر الآمن .

تتكون دائرة المنزل النموذجية من سلكين متوازيين ممدوين خلال المنزل يحملان فرق للجهد مقداره 120 V عن طريق أسلاك الوصل . ويوضح الشكل (١٨ - ١٦) هذه الدائرة . يتصل كل مصباح للاضاءة أو جهاز منزلى ... الخ بطرف مع سلك الجهد العالى ويتصل الطرف الآخر الى سلك الجهد المنخفض . عندما يغلق مفتاح جهاز مافان التيار يسرى خلال الجهاز من السلك + الى السلك − القادمين من محطة القوى . وعادة مايكون سلك الجهد المنخفض متصلا بالأرض . تحتوى معظم أجهزة 120 V على شعبة ثالثة فى كابس القدرة ، وتقوم هذه الشعبة بعمل وصلة بين سلك الأرض والغلاف المعدنى للجهاز . فلو مس سلك الجهد العالى − عن طريق الصدفة − الغلاف المعدنى للجهاز فان اتصالا مباشرا يتم بالأرض .وتأثير هذا كما لو كان كل من سلك الجهد العالى والجهد المنخفض قد تلامسا معا مباشرة ، مما ينتج عنه سريان تيار ضخم خلال سلك الجهد العالى الى الأرض مما يجعل المصهر الموجود على التوالى مع سلك الجهد العالى ينصهر . ولو أن سلك الأرض لم يكن موجودا لتسبب هذا العطل فى جعل الجهاز كله « عائما » عند جهد عال بحيث يتعرض أى شخص يلمس الجهاز لصدمة كهربائية .



شكل (١٨ - ١٦) تقوم الأجهزة المنزلية المبينة بدور المقاومات ويمكن تشغيل أى منها بغلق المفتاح الخاص به

لنحسب الآن ماهو التيار الذى يسحبه مصباح 60w فى الشكل (١٨ - ١٦)عندما يضاء بغلق المفتاح الخاص به . حيث أن القدرة = VI وحيث أن $V = 120$ V ، $P = 60$w فى هذه الحالة ، فاننا نجد ان التيار المار خلال المصباح هو $I = 0.50$ A . أما الموقد فهو حين يدار يقوم بسحب تيار قدره 10 A ويسحب جهاز الراديو o.167A . ويسحب المصباح 120w تيارا قدر 1.0A فاذا أديرت كل الأجهزة والمصابيح معا لسحبت تيارا كليا قدره 11.667 A يمر فى المصهر . ولاتنصهر دوائر المنزل عادة لأقل من 15A ولذا فليس هناك خطر فى هذه الحالة .

يحتاج المنزل الذى يحوى عددا كبيرا من الأجهزة الكهربائية الى أكثر من دائرة . ولمعظم المنازل دوائر بها مصهرات منفصلة مثل تلك التى فى الشكل (١٨ - ١٦) . تمتد كل من هذه الدوائر ابتداء من المنبع الذى يستمد القوى من السلك الواصل وتستمر الى داخل المنزل لتدخل فى الأجزاء العديدة منه .

من الشيق ان تحسب مقاومة مصباح الاضاءة . حين يكون المصباح باردا فان مقاومته لاتكون كبيرة ولكن حين يتم توصيله بالجهد اللازم وهو عادة 120 V ، فان عنصر مقاومته يصبح ساخنا لدرجة البياض ، وكما ناقشنا فى الفصل السابع عشر تزداد مقاومته بدرجة كبيرة حين يسخن . وحين يكون ساخنا فانه يعمل حسب الواطية

(القدرة) المدونة عليه . افترض ان لدينا مصباح اضاءة مدون عليه 120V - 60w نحن نعرف أن .

$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

أو

$$60 = \frac{(120)^2}{R}$$

ومنها

$$R = 240\,\Omega$$

ويمكنك التحقق من الوحدات التى ظهرت فى الاجابة .

١٨ - ٨' الأمان الكهربائى

بما أننا نستخدم الأجهزة الكهربائية يوميا ، لذا يجب علينا أن نفهم عناصر الأمان الكهربائى . والكهرباء قد تقتل الانسان بأحدى طريقتين : بأن تسبب عطبا فى عضلات القلب والرئتين (أو أية أعضاء حيوية أخرى) أو أن تسبب حروقا قاتلة)

يمكن لقدر ضئيل من التيار الكهربائى أن يعطل عمل الخلية بشدة فى ذلك الجزء من الجسم الذى يمر خلاله . عندما تكون قيمة التيار الكهربائى0.001 أو أكبر فان الانسان يستطيع أن يشعر باحساس الصدمة . وعند تيارات أكبر من هذا بعشر مرات ، 0.01A فان الانسان لايكون قادرا على ترك السلك الكهربائى من يده لأن التيار يجعل عضلات اليد تنقبض بعنف . التيارات الأكبر من 0.02A خلال جذع الانسان تصاب عضلات التنفس بالشلل ويتوقف التنفس ، ومالم يجر التنفس الصناعى على الفور فان الضحية تختنق . ولابد أن تحرر الضحية تماما من أى مصدر للجهد قبل أن يمكن لمسها بأمان ، وإلا فان المنقذ أيضا يتعرض لخطر شديد . اذا مر تيار يبلغ 0.1A خلال منطقة القلب فانه يصدم عضلات القلب فيحدث فيها انقباضات سريعة وغير منتظمة (اختلاجات بطينية) بحيث لايعود القلب يعمل . وفى النهاية فان تيارا مقداره 1A أو أكثر يسبب حروقا خطيرة اذا مر خلال أنسجة الجسم .

التيار الكهربائى هو أهم كمية يمكن التحكم فيها لمنع الضرر . أما الجهد فأهميته ترجع الى أنه هو الذى يسبب سريان التيار . وعلى الرغم من أن جسدك قد يشحن الى جهد أعلى بآلاف الفولتات Volts عن معدن السيارة ، حين

تنزلق ببساطة على مقعد السيارة ، الا أنك تحس بوخزة بسيطة حين تلمس مقبض الباب ، فجسدك لايمكن أن يحتفظ بشحنات كثيرة ولذا كان التيار الذى يسرى خلال يدك الى مقبض الباب تيارا قصير العمر، ويكون الأثر الناتج على خلايا جسدك مهملا .

تكاد دوائر 120V المنزلية أن تكون أكيدة فى احداث الوفاة فى بعض الأحيان .فأحد الأسلاك فى الدائرة يتصل دائما بالأرض ، ولذا يكون دائما عند نفس جهد انابيب المياه فى المنزل . افترض أن انسانا يرقد فى حوض الاستحمام ، يتصل جسمه بطبيعة الامر بالارض خلال المياه وأنابيب المياه . فلو أن يده لمست عن طريق الصدفة سلك الجهد العالى من دائرة المنزل (عن طريق لمس سلك مكشوف فى جهاز راديو او سخان مثلا) فان التيار يسرى خلال جسمه الى الأرض . ونظرا للاتصال الجيد الذى يعمله الجسم مع الأرض فان مقاومة الجسم تكون منخفضة ، ويكون التيار الذى يسرى خلال الجسم كبيرا بدرجة تكفى لصعقه .

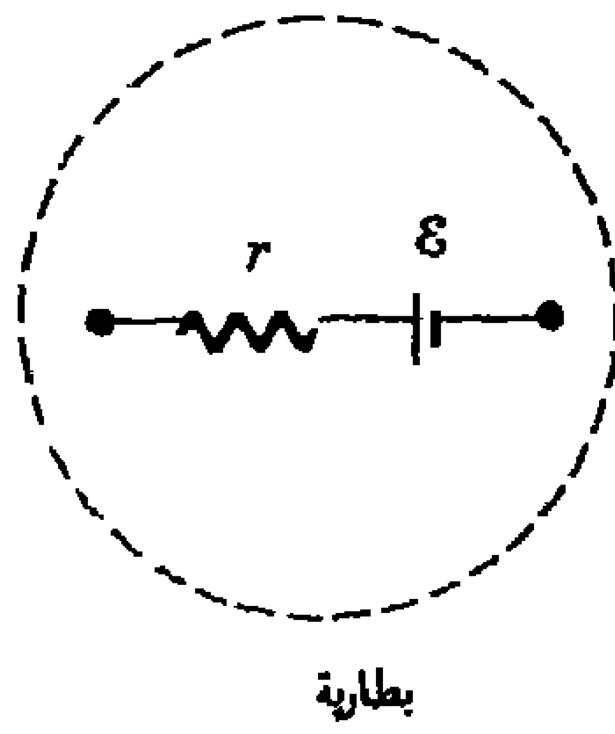
هناك مواقف مشابهة تحدث فى ظروف أخرى . فمثلا اذا لمست بالصدفة سلكا مكشوفا أثناء وقوفك على الأرض بأقدام مبتلة فانك تكون فى موقف أخطر بكثير عما لو كنت تقف على سطح جاف معزول ، لأن الدائرة الكهربائية خلال جسدك الى الأرض تكون مقاومتها كبيرة جدا لو أن اقدامك كانت جافة . وبالمثل ، لو أنك تعرضت لصدمة كهربائية نتيجة لمس سلك مكشوف او جهاز به عطب ، فان الصدمة تكون أشد لو كانت يدك الأخرى تلمس الصنبور الذى على الحوض او كانت فى ماء الغسيل .

من هذه الأمثلة يتضح لك ان خطر الصدمة الكهربائية يمكن تحاشيه بتجنب مرور التيار خلال جسدك حين يكون الجهد أكثر من 50 V عليك بتجنب لمس أى جزء معدنى مكشوف من الدائرة . واذا كان عليك أن تلمس سلكا ذا جهد مرتفع مثل حالة حادث خط من خطوط القدرة الكهربائية ، وحين لاتتوفر النجدة العاجلة فعليك باستعمال عصا جافة او اية قطعة من مادة عازلة لتحريكه . حين تكون فى شك حول الأمان ، تجنب الاتصال او الاقتراب من اى معدن او أى أرض مبتلة . وفوق كل هذا لاتدع جسدك يصبح هو حلقة الاتصال بين نقطتين بينهما فرق شاسع فى الجهد .

١٨ - ٩ ق . د . ك والجهد الطرفى للبطارية

من المحتمل أن كل إنسان قد لاحظ فى وقت أو آخر أن أنوار السيارة تخفت قليلا عندما يبدأ المحرك فى الدوران ، ويرجع السبب الى أن مبدىء الحركة الكهربائى فى

السيارة يقوم بسحب كمية كبيرة من التيار من البطارية . وهو بهذا يخفض الجهد بين طرفى البطارية فتخفت اضواء السيارة . سنبحث الآن عدم الثبات فى فرق الجهد الطرفى للبطارية .



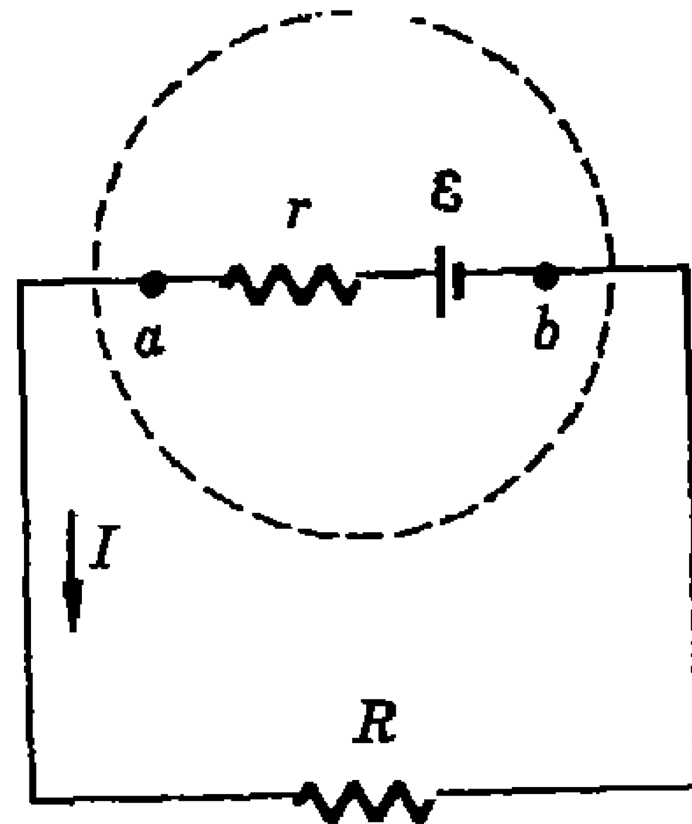
بطارية

شكل (١٨ – ١٧) تعمل البطارية كما لو كانت مكونة من ق . د . ك صافية متصلة على التوالى مع مقاوم كما هو مبين

تتولد القوة الدافعة الكهربائية للبطارية من التفاعلات الكيميائية بداخلها كما أشير الى ذلك فى الفصل السابق . وحين لايسحب أى تيار من البطارية فان فرق الجهد بين طرفيها يكون مساويا لقوتها الدافعة الكهربائية .

ولكن البطارية تعتبر أداة كيميائية معقدة وتتصرف فعلا كقوة دافعة كهربائية (ق . د . ك) متصلة على التوالى مع مقاوم . ويوضح الشكل (١٨ – ١٧) الدائرة المكافئة للبطارية .

نلاحظ أنه حين لايسحب تيار من البطارية ، فإنه لايوجد فرق للجهد عبر المقاومة الداخلية للبطارية ، ومن ثم يكون فرق الجهد بين طرفى البطارية مساويا للقوة الدافعة الكهربائية ، ولكن اذا كانت البطارية متصلة عبر مقاوم كما هو فى الشكل (١٨ – ١٨) فان تيارا I يسرى ويجعل فرق الجهد الطرفى مساويا $\varepsilon - Ir$



شكل (١٨ – ١٨) الجهد الطرفى V للبطارية هو $\varepsilon - Ir$

فى حالة بطاريه 12 V جيدة ، تكون المقاومة الداخلية فى حدود 0.01 Ω فقط ، فإذا كانت البطارية متصله عبر مقاوم 3-Ω فإنه يكون لدينا

$$I = \frac{12}{3 + 0.01} \approx 4\ \text{A}$$

ويكون فرق الجهد الطرفى هو عبارة عن فرق الجهد بين النقطتين a ، b وهو

$$\text{الجهد الطرفى} = 12 - (4)(0.01) = 11.96\ \text{V}$$

فى هذه الحالة يكون الجهد الطرفى مساويا تقريبا للقوة الدافعة الكهربائية

ولكن حين يتقدم العمر بالبطارية تزداد مقاومتها ، فلو كانت مقاومة البطارية فى الشكل (١٨ – ١٨) 1.0 Ω لكان التيار هو :

$$I = \tfrac{12}{4} = 3.0\ \text{A}$$

أما الجهد الطرفى فيكون

$$\text{الجهد الطرفى} = 12 - 3.0 = 9.0\ \text{V}$$

يجب ان يكون واضحا انه عندما يقوم مبدىء الحركة فى السيارة بسحب 100 A من البطارية فان فرق الجهد الطرفى حتى لبطارية جديدة ينخفض بشكل ملحوظ .

مثال توضيحي ١٨ – ١١ : ماهو الجهد الطرفى لكل من البطاريتين فى الشكل (١٨ – ١٩) ؟

طريقة الحل : حيث ان البطاريتين متضادتان لذا فالقوة الدافعة الكهربائية المؤثرة فى الدائرة هى 18 V ويسرى التيار فى الاتجاه المبين وتكون قيمته هى

$$I = \frac{18}{9} = 2 \text{ A}$$

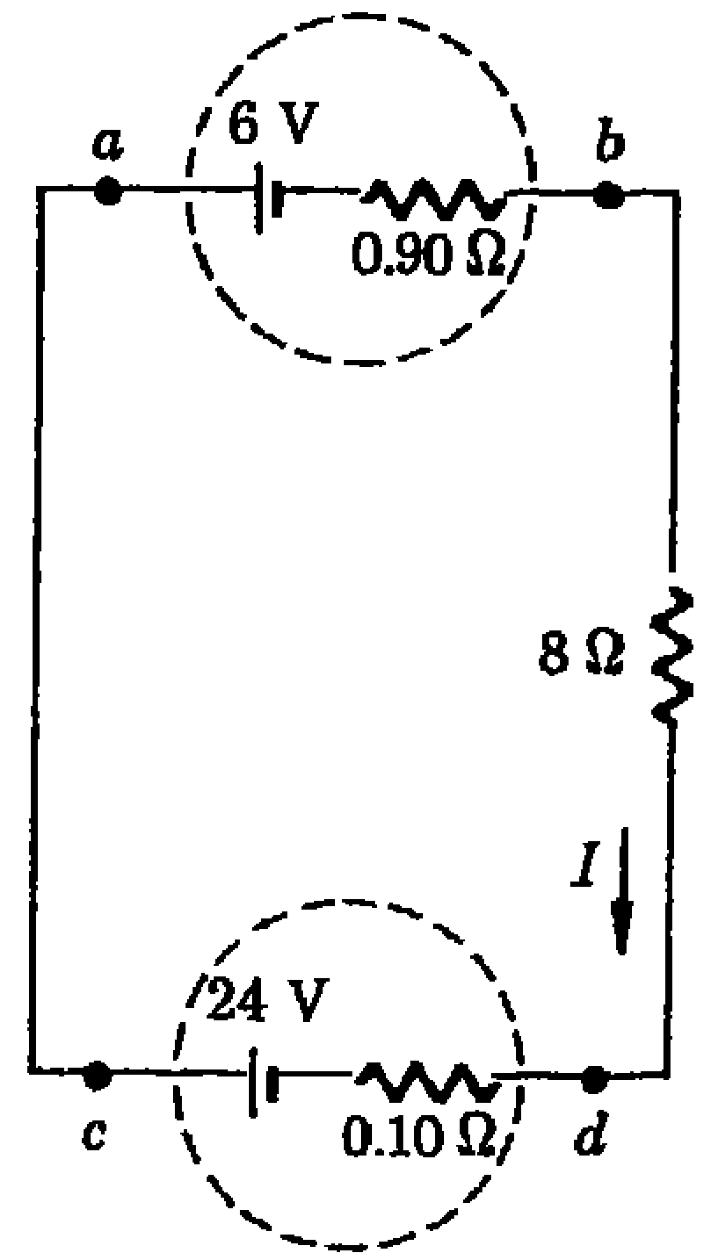
فرق الجهد بين النقطتين d الى c هو

$$V = -0.2 + 24 = 23.8 \text{ V}$$

ومن ثم فالجهد الطرفى للبطارية 24 V يكون أقل من ق . د . ك لها . بالنسبة للجهد الطرفى للبطارية الأخرى من b الى a نجد أن

$$V = +1.8 + 6 = 7.8 \text{ V}$$

نلاحظ ان الجهد الطرفى لهذه البطارية أكبر من ق . د . ك لها . ويكون الوضع عادة هكذا عندما تكون البطارية تحت الشحن مثل البطارية 6V فى المثال .



شكل (١٨ – ١٩)
تقوم البطارية 24 V بشحن البطارية 6V ونجد ان الجهد الطرفى للبطارية التى تفرغ اقل من قوتها الدافعة الكهربائية بينما العكس هو الصحيح بالنسبة للبطارية التى تشحن

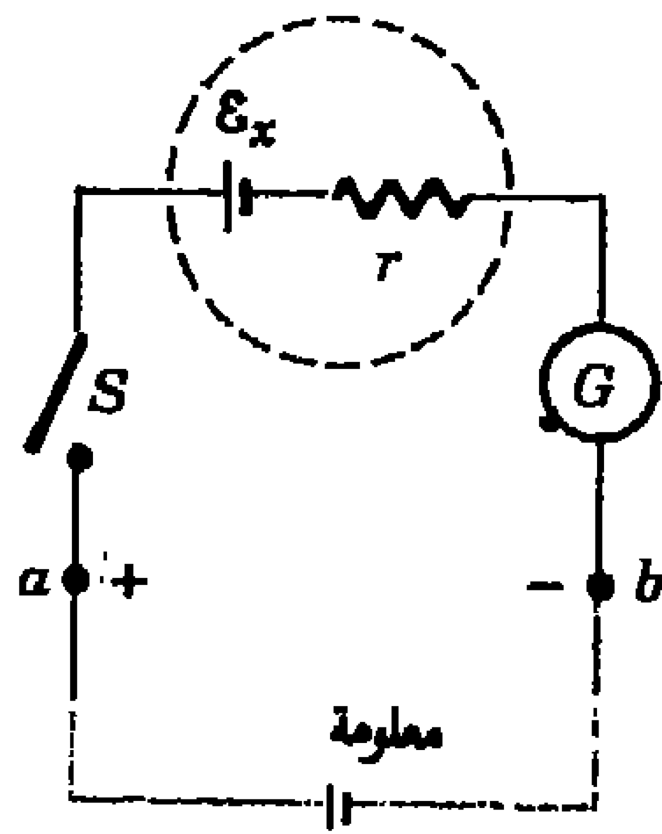
١٨ – ١٠ مقياس الجهد

اذا أردنا أن نقيس فرق الجهد بين نقطتين فى دائرة ما ، فانه يكون من المهم أحيانا ألا يسحب جهاز قياس الجهد أى تيار ، كما فى محاولة قياس ق . د . ك لبطارية ذات مقاومة داخلية كبيرة . أو افترض أننا نريد قياس فرق الجهد بين نقطتين على جسم انسان مثلما يحدث عند قياس موجات المخ . يقوم الجسم هنا بدور البطارية ذات المقاومة الداخلية الكبيرة . من الواضح انه لاتيار يمكن أن يسحب أثناء القياس اذا كان المراد قياس ق . د . ك . مستقرة .

يقوم أى فولتميتر بسحب قليل من التيار من النقط التى يوصل اليها ، وعلى الرغم من أن الفولتمترات الالكترونية تسحب قدرا ضئيلا جدا من التيار من مصدر الجهد الذى تقوم بقياسه ، الا أن الفولتمترات المعملية لها دائما مقاومة تبلغ عدة مئات من الأومات ohms وعلى ذلك ، عند توصيلها عبر جهد يبلغ عدة Volts فانها تسحب تيارا ملحوظا ، لذا فاننا نحتاج الى جهاز بسيط لقياس الجهد بحيث لايقوم بسحب اية تيارات أثناء القياس ، وهذا الجهاز هو مقياس الجهد .

افترض انك تريد قياس بطارية مجهولة لها ق . د . ك $\mathcal{E}_x$. لو انك تستطيع ايجاد مجموعة كبيرة من البطاريات المعايرة ، لأمكنك توصيل كل من هذه البطاريات

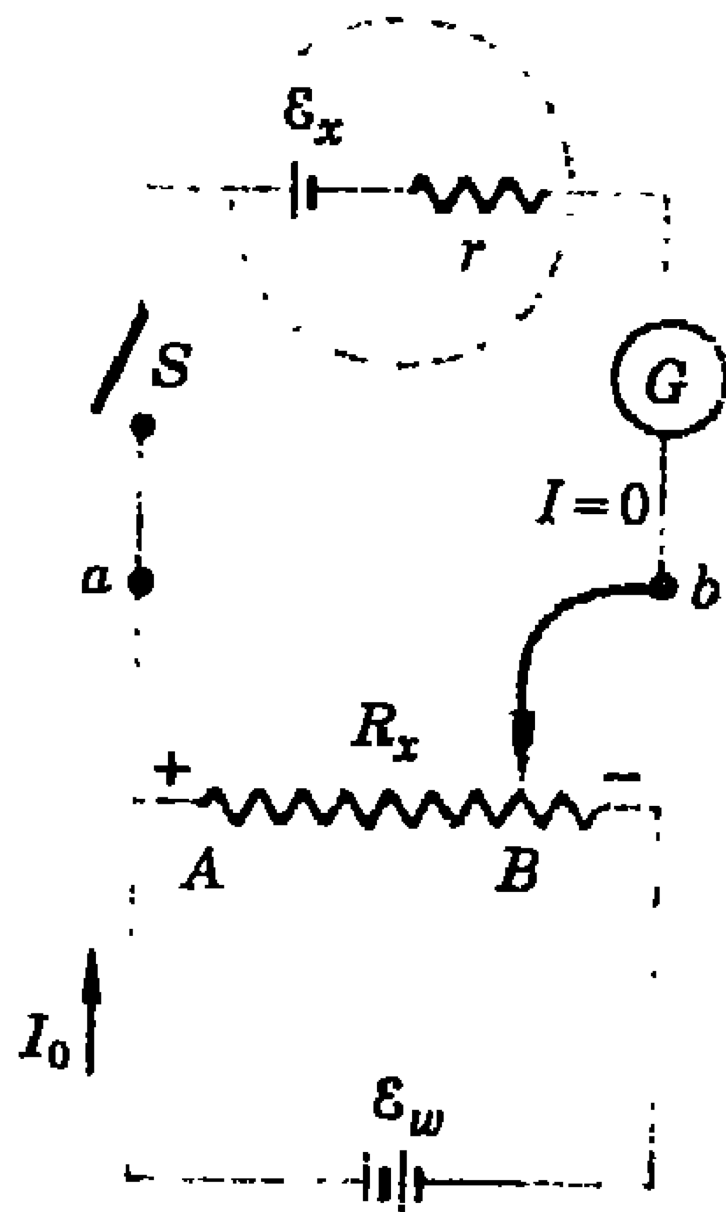
المعلومة فى دائرة كالتى فى شكل (١٨ – ٢٠أ) ويمكنك حينئذ ضغط المفتاح برفق حتى ترى ان الجلفانومتر سينحرف أم لا . وحين تصل الى بطارية لاينحرف معها الجلفانومتر فان معنى ذلك أن ق . د . ك للبطاريتين قد وزنت احداهما الاخرى بحيث لايمر تيار قط ، ومن ثم يمكننا معرفة ان البطارية المجهولة لها نفس ق . د . ك كالبطارية المعلومة . حيث أن القياسات قد تمت حين لم يكن هناك تيار مسحوب من البطارية المجهولة لذا فالمقاومة الداخلية للبطارية لاتأثير لها .



(a)

ليس من العملى استخدام عدد كبير من البطاريات المعلومة لانها لن تكون متاحة عادة . ولكن الدائرة المرسومة فى الشكل (١٨ – ٢٠ ب) تخدم نفس الغرض ولاتحتاج – كما سنرى – الا الى بطارية قياسية واحدة ، ويقوم الانسان بمجرد تحريك الوصلة المنزلقة عند B على طول المقاوم المتغير حتى يصير فرق الجهد من A الى B مساويا للكمية $\mathcal{E}_x$ (يشار الى جزء الدائرة الموجود تحت النقطتين a و b بأنه مجزىء الجهد) . وعندما يكون فرق الجهد من A الى B يساوى بالضبط $\mathcal{E}_x$ فانه لن يمر تيار فى الدائرة العليا ويكون لدينا :

$$\mathcal{E}_x = I_0 R_x$$



(ب)

لو أن $\mathcal{E}_x$ استبدل بها الآن بطارية قياسية معلومة $\mathcal{E}_s$ فان مقياس الجهد يستطيع مرة أخرى ان يتزن بحيث لاينحرف الجلفانومتر . وعندئذ .

$$\mathcal{E}_s = I_0 R_s$$

بقسمة هاتين المعادلتين نجد أن

$$\frac{\mathcal{E}_x}{\mathcal{E}_s} = \frac{R_x}{R_s}$$

عمليا ، يتم معايرة المقاوم بحيث تكون $\frac{R_x}{R_s}$ معلومة ، وبمعرفة قيمة الخلية القياسية $\mathcal{E}_s$ ، يمكن بسهولة حساب قيمة ق . د . ك المجهولة . (من الشائع أن يكون المقاوم مجرد سلك مقاومه طويل ومنتظم بحيث تكون R متناسبة مع طول السلك من A الى B ، وتكون النسبة $\frac{R_x}{R_s}$ هى نفسها النسبة بين الأطوال المناظرة $\frac{L_x}{L_s}$ للسلك .) .

شكل (١٨ – ٢٠) فى الجزء (أ) حين لايمر تيار اثناء اغلاق S فمعنى هذا ان $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_{known}$ للحصول على $\mathcal{E}_{known}$ متغيرة فاننا نستخدم الدائرة المرسومة تحت a ، b فى الجزء (ب) التيار خلال G يكون صفرا عندما يكون فرق الجهد من A الى B مساويا $\mathcal{E}_x$. وتقوم هذه الأداة ، مقياس الجهد ، بقياس ق . د . ك لخلية مجهولة

مثال توضيحى ١٨ – ١٢ : حين توضع وصلات كهربائية عند مواقع مختلفة على رأس شخص ما ، فانه تلاحظ فروق للجهد ذات طابع متذبذب . وهذه الفروق فى الجهد يمكن تسجيلها بواسطة جهاز رسم المخ . وتبلغ القيمة النموذجية لهذه الفروق فى الجهد ماقيمته 5×10^{-4} V ويكون تذبذبها بمعدل يصل الى 0.10 s افترض ان مقاومة الرأس بين نقطتين من هذه الوصلات تبلغ $10,000\ \Omega$. ماهو التيار الذى يمكن

لجهاز تسجيل الجهد سحبه من المصدر المراد قياسه اذا كانت قراءة الجهد بها خطأ أقل من ١ فى المائة ، وكم هى مقاومة جهاز التسجيل ؟

طريقة الحل : يقوم ذلك الجزء من رأس الشخص والمحصور بين القطبين بدور بطارية لها ق د ك = V_0 ومقاومها الداخلية = $10{,}000\ \Omega$ حينما يسحب تيار مقداره I فان المقاومة الداخلية تسبب خطأ فى الجهد مقداره $10{,}000I$ ولكننا نريد أن يكون :

$$\frac{10{,}000I}{V_0} < 0.01$$

وعلى ذلك لايستطيع جهاز التسجيل ان يسحب تيارا يزيد على $\frac{0.01\ V_0}{10{,}000}$ أو 10^{-6} A

ولما كان التيار حين يسرى خلال مسجل الجهد وذلك بواسطة مصدر الجهد الذى قيمته V_0 فاننا نستطيع باستخدام قانون أوم ان نوجد المقاومة R_0 لجهاز التسجيل . اى أن

$$V = IR$$

وتصبح

$$V_0 = (10^{-6}V_0)R_0$$

ومنها تكون مقاومة جهاز التسجيل على الأقل .

$$R_0 = 10^6\ \Omega$$

وكثير من أجهزة التسجيل الحديثة تستعمل مبدأ مقياس الجهد ، ولها فى الواقع مقاومة لانهائية أثناء اجراء القياسات .

ملخص

تنص قاعدة النقطة لكيرتشوف على أن مجموع التيارات الداخلة الى نقطة مايجب أن يساوى مجموع كل التيارات الخارجة من نفس النقطة . أما قاعدة العروة فتنص على أن المجموع الجبرى لتغيرات الجهد حول دائرة مقفلة (أو عروة) يجب أن يكون صفرا .

تجمع المقاومات المتصلة على التوالى مباشرة أما المقاومات التى على التوازى فتجمع مقلوباتها .

تجمع المكثفات المتصلة على التوازى مباشرة أما المكثفات التى على التوالى فتجمع مقلوباتها . عندما يسرى تيار I خلال مقاومة R فان القدرة المستهلكة فى المقاوم تكون I^2R . وتظهر هذه الطاقة على هيئة طاقة حرارية . اذا مر تيار I خلال فرق للجهد V من أى نوع فان القدرة المستهلكة بواسطة هذا التيار تكون VI.

تتلخص قاعدة الأمان الابتدائية والتى يجب اتباعها عند تناول الكهرباء فيما يلى : لاتدع جسدك يصبح حلقة الوصل بين نقطتين بينهما فرق شاسع للجهد مطلقا .

تعمل البطارية مثل ق . د . ك $\mathcal{E}$ متصلة على التوالى مع مقاومة داخلية r ، ويكون فرق الجهد الطرفى للبطارية مختلفا عن $\mathcal{E}$ بكمية قدرها Ir ، حيث I هو التيار خلال البطارية .

يقيس مقياس الجهد الجهود بدون سحب تيار ، ونتيجة لهذا يمكن استعماله لقياس ق . د . ك لمصادر تحتوى على مقاومة داخلية محسوسة .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تذكر قاعدة النقطة لكيرتشوف وأن تعطى أمثلة على تطبيقاتها .

٢ – أن تذكر قاعدة العروة لكيرتشوف وتكتب معادلة العروة لدائرة على التوالى تحوى بطاريات ومقاومات .

٣ – أن تختصر مجموعة معينة من المقاومات المتصلة على التوالى والتوازى لتصير مقاوما مكافئا واحدا .

٤ – أن تختصر مجموعة معينة من المكثفات المتصلة على التوالى والتوازى لتصير مكثفا مكافئا واحدا .

٥ – أن تحل دوائر التيار المستمر التى تحوى بطاريات ، مقاومات ومكثفات مستعملا قواعد كيرتشوف .

٦ – أن تستخدم معادلة القدرة ، $P = VI$ لكى توجد القدرة المفقودة أو المكتسبة فى مقاوم ، وبطارية ومكثف تحت ظروف التيار المستمر .

٧ – أن ترسم دائرة منزلية نموذجية وأن تشير الى العناصر المختلفة فيها . أن تحسب التيار المسحوب فى كل جزء من الدائرة حين تعلم الاجهزة المستخدمة والتى تستمد من هذه الدائرة طاقتها .

٨ – أن تحلل موقفا عمليا من وجهة نظر الأمان .

٩ – أن تشرح لماذا لايكون الجهد الطرفى للبطارية مساويا دائما لقيمة ق . د . ك للبطارية . ان توجد الجهد الطرفى اذا علمت قيم كل من $\mathcal{E}$، I ، r.

١٠ – أن ترسم دائرة مقياس الجهد وأن تشرح وظيفة هذا الجهاز .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

قاعدة النقطة لكيرتشوف .

قاعدة العروة لكيرتشوف .

التوصيل على التوالى ، $R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots$ $\qquad \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots$

التوصيل على التوازى . $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots$ $\qquad C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots$ $\qquad P = VI$

ق د . ك . فى مقابل الجهد الطرفى لبطارية .

لاتصبح أبدا حلقة الاتصال

أسئلة وتخمينات

١ – مقاوم متصل بين نقطتى a و b كيف يمكن معرفة تغير الجهد من a الى b وهل هو ارتفاع أم انخفاض ، كرر بالنسبة لبطارية وبالنسبة لمكثف .

٢ – اشرح النص التالى : للمقاومات التى على التوالى يكون المقاوم المكافىء دائما أكبر من أكبرها ، والتى على التوازى يكون المقاوم المكافىء أصغر من أصغرها . ماهو النص المقابل فى حالة المكثفات ؟

٣ – لماذا يقوم الانسان بتوصيل بطاريتين على التوالى ؟ أو على التوازى ؟

٤ – لايجب أبدا توصيل بطاريتين على التوازى مالم تكونا متطابقتين تقريبا . لماذا ؟

٥ – هل تكون الطاقة المختزنة فى ثلاثة مكثفات متطابقة ومشحونة من بطارية 12 V أكبر مايمكن حين تتصل المكثفات على التوالى أم على التوازى ؟

٦ – هل تعتمد الطاقة المختزنة فى مكثفات ثلاثة متصلة على التوالى على أيها يقع فى المنتصف ؟ اشرح .

٧ – اشرح لماذا تكون الشحنات متطابقة على مكثفات مختلفة متعددة شحنت وهى على التوالى بينما تكون الشحنات متباينة على مكثفات مختلفة متصلة على التوازى .

٨ – عندما يقبض انسان على سلكين متصلين بلوحى مكثف مشحون فانه يشعر بصدمة . ويكون الاثر أشد فى حالة مكثف $2\text{-}\mu F$ عنه فى حالة $0.02\text{-}\mu F$ على الرغم من أن كليهما شحن الى نفس الفرق فى الجهد . لماذا ؟

٩ – تقف الطيور دائما على أسلاك الضغط العالى . لماذا لاتصعق هذه الطيور علما بأن الأسلاك قد يكون بها ثغرات ليس عليها عازل ؟

١٠ – اذا سرى تيار لايتجاوز كسرا صغيرا من الأمبير ampere خلال احدى اليدين ومر من اليد الاخرى فان الانسان قد يصعق . اما اذا مر التيار من احدى اليدين وخرج من المرفق الذى يعلو اليد فان الانسان يمكنه أن يظل حيا حتى لو كان التيار من الكبر بحيث يحرق اللحم . اشرح .

١١ – تقلق الأمهات دائما حين يلهو الأطفال بالقرب من مخارج الكهرباء . اشرح العوامل المختلفة التى تحدد الى أى مدى يبلغ سوء الصدمة التى يتعرض لها الطفل . ماذا يحدث لو أن طفلا صغيرا قام بقطع سلك مصباح كهربائى الى قسمين مستخدما زردية لقطع اسلاك غير معزولة وذلك حين كان السلك متصلا بمصدر الكهرباء ؟ هل يكون الطفل معرضا لأى خطر فى هذه الحالة ؟

١٢ – أن تلمس سلكا مكشوفا من دائرة الانارة المنزلية حين تكون واقفا فى طابق تحت مستوى الأرض (بدروم) رطب ، أشد خطرا عما اذا كنت واقفا فى الطابق الثانى . لماذا ؟

١٣ – من أشد الأشياء خطورة أن تستعمل راديو كهربائيا بالقرب من حوض الاستحمام أثناء الاستحمام . لماذا ؟ هل ينطبق نفس الشىء على جهاز راديو يعمل بالبطارية ؟

١٤ – فى بعض الأغراض مثل رسم القلب ، اختبار تلف المخ ، كشف الكذب ، ... الخ فاننا نقيس فرق الجهد بين أجزاء مختلفة من جسم الانسان . لما لايستخدم فولتمتر عادى لهذه الأغراض ؟ ماهى الاحتياطات الواجب اتخاذها ؟

١٥ – تحول منتجو السيارات من استخدام النظام الكهربائى 6V الى 12 V وذلك منذ زمن ليس بالبعيد . لماذا ؟

١٦ – قدر استهلاك القدرة الكهربائية لمدينة قريبة . ماهو التيار الذى يجب مد المدينة به عند جهد يبلغ 220V لتحصل المدينة على هذه الطاقة ؟ اشرح لماذا كان استخدام محولات القدرة ذات الجهد العالى جدا مفيدا (أى 10^5 V)

مسائل :

اهمل المقاومة الداخلية للبطاريات فى حالة عدم النص عليها فى المسائل .

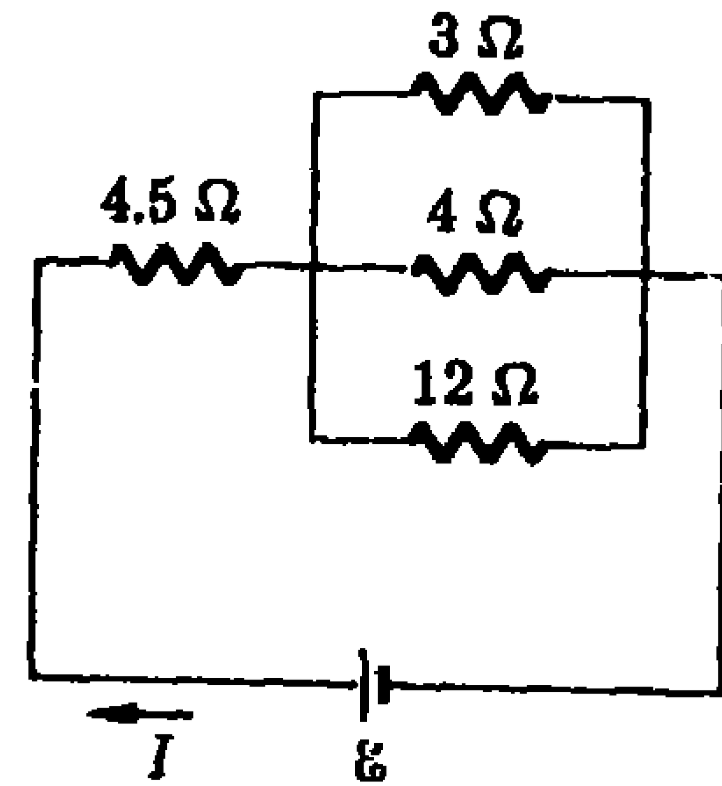
١ – (أ) اوجد المقاومة المكافئة للدائرة المرسومة فى الشكل (أ) ١٨ – ١ . (ب) اوجد I إذا كانت $\mathcal{E}$ تساوى 12. V .

٢ – فى الشكل م١٨ – ٢ إذا كانت قيمة $\mathcal{E}$ هى 12.0 V وكان كل مقاوم يساوى 2.0 n فما هى المقاومة المكافئة ؟ وماهو التيار

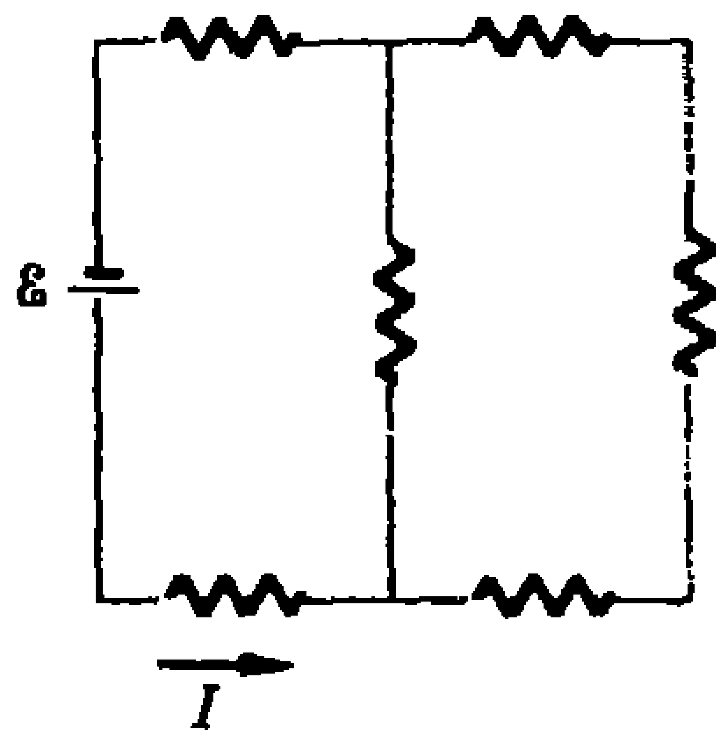
٣ – اوجد المقاومة المكافئة للدائرة المرسومة فى الشكل م١٨ – ٣ عندما (أ) يكون المفتاح S مفتوحا و (ب) عندما يكون S مغلقة

٤ – اوجد المقاومة المكافئة للدائرة المرسومة فى الشكل م١٨ – ٤ إذا كان كل مقاوم يساوى 4 Ω

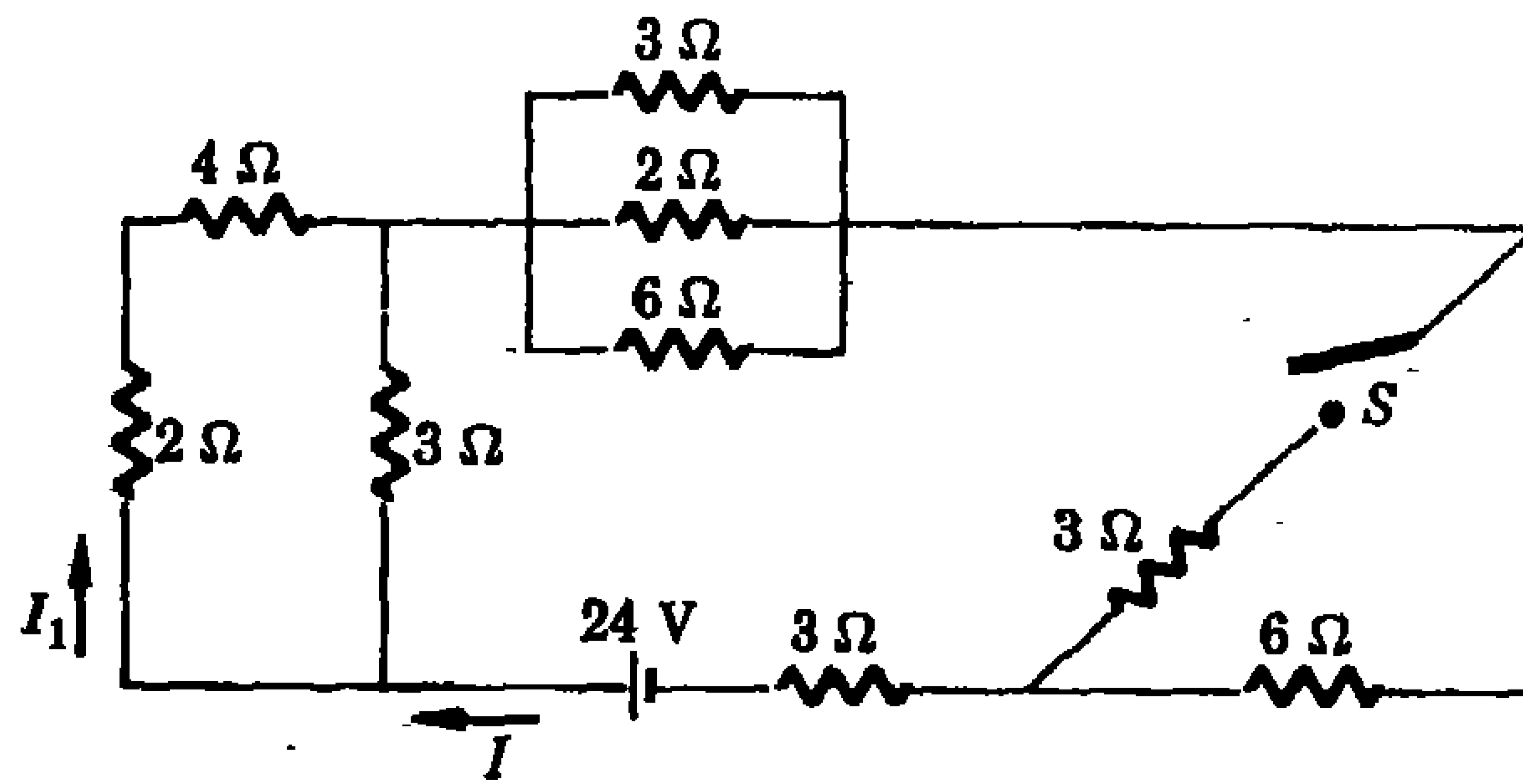
٥ – تبلغ قيمة كل مكثف فى شكل م١٨ – ٥ 2.0 μF اوجد السعة المكافئة للمجموعة .



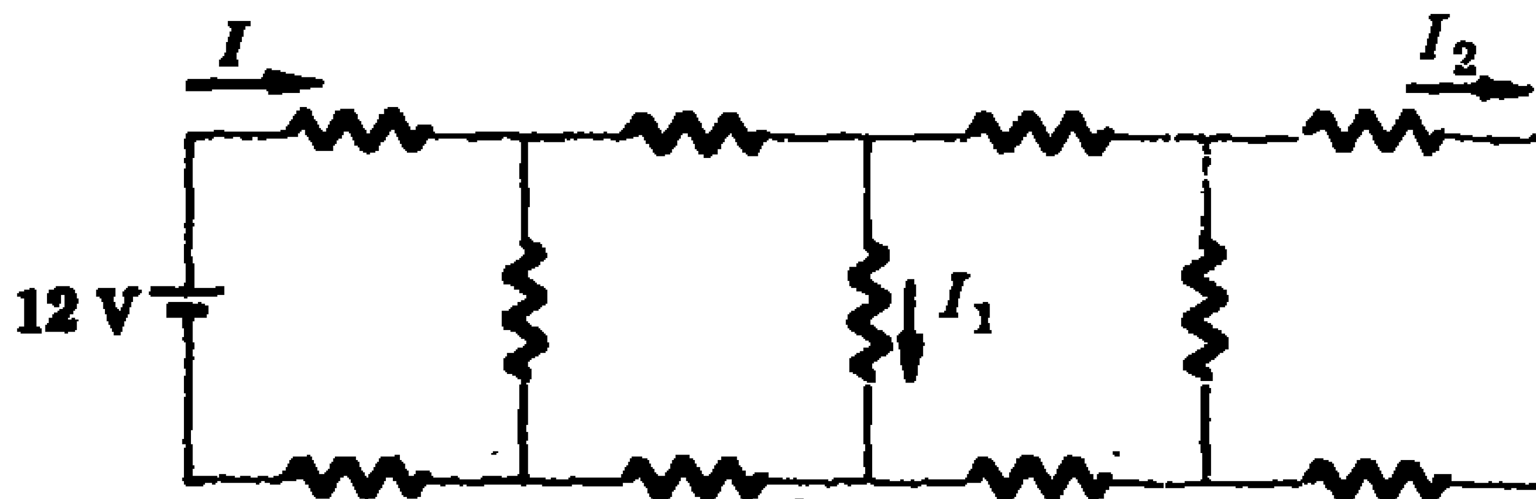
شكل م ١٨ – ١



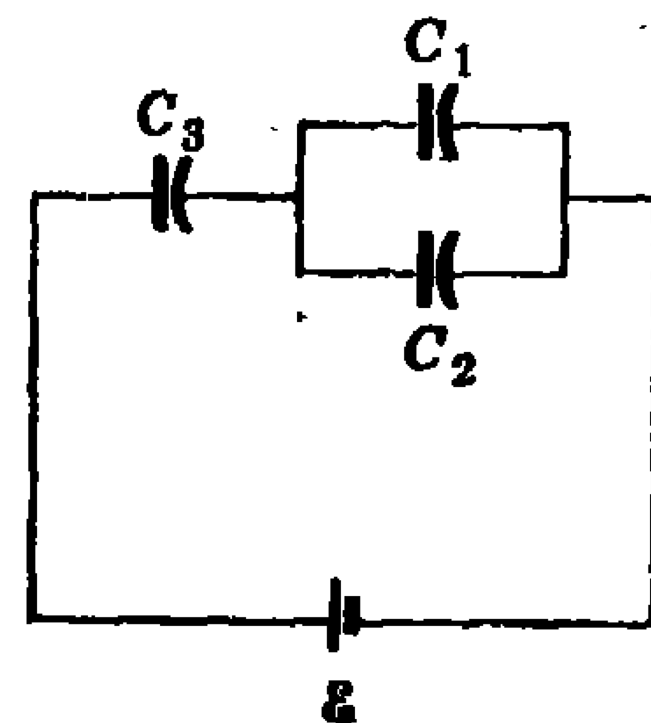
شكل م ١٨ – ٢



شكل م ١٨ – ٣



شكل م ١٨ – ٤



شكل م ١٨ – ٥

٦ – اوجد السعة المكافئة للمجموعة المرسومة فى شكل م١٨ – ٦ .

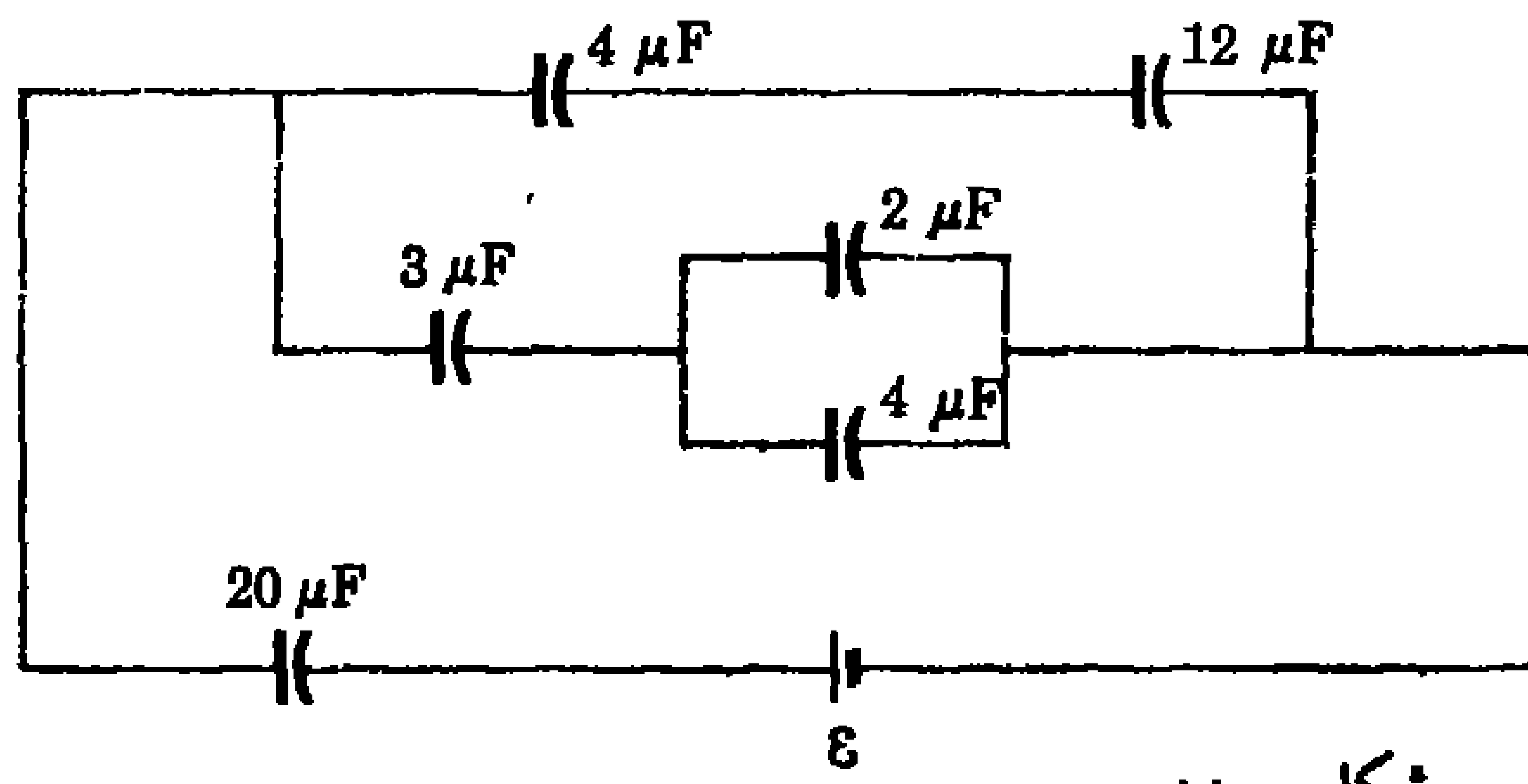
٧ – اوجد I_1 ، I_2 ، I_3 فى الدائرة التى فى الشكل م١٨ –٧ .

٨ – يقرأ الأمبير فى الشكل م١٨ – ٨ 5 A أوجد I_1 ، I_2 ، ε وقراءة الفولتميتر .

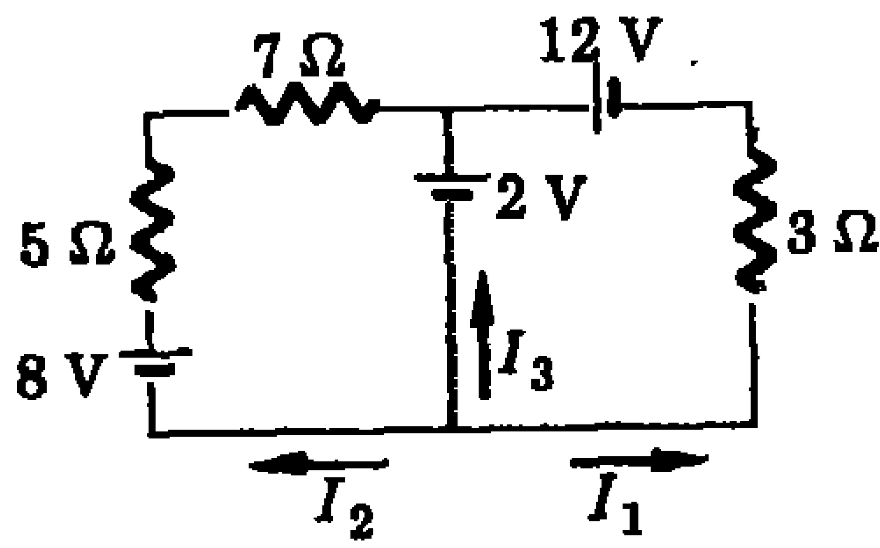
٩* – اوجد التيارين I ، I_1 وكذا الشحنة الموجودة على المكثف 7-μF فى الدائرة التى فى شكل م ١٨ – ٩ .

تلميح : لاحظ ان التيارات فى العديد من الاسلاك قيمتها صفر .

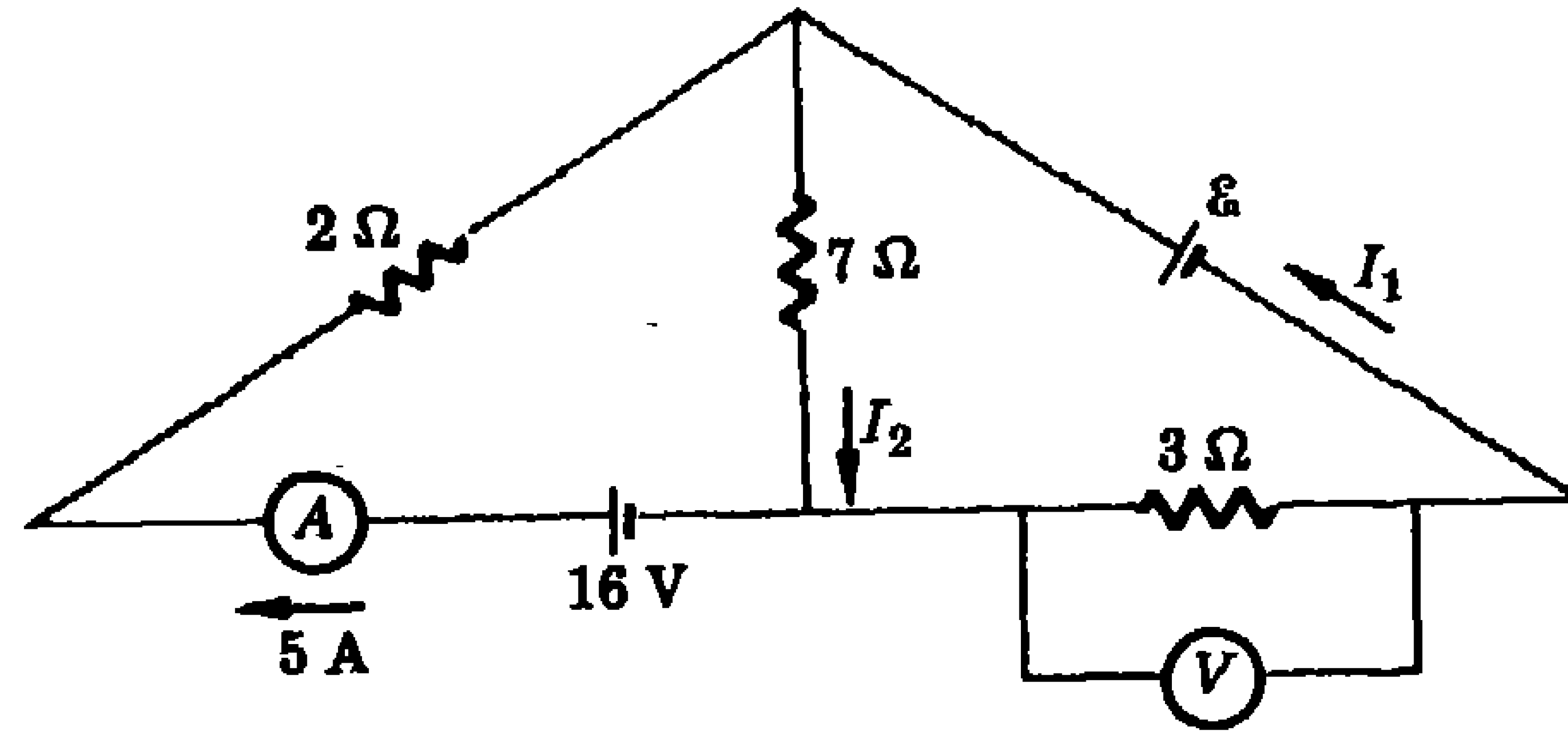
١٠ – بالنسبة للدائرة الموضحة فى الشكل م (١٨ – ١٠) اوجد : (أ)التيار المار خلال البطارية ، (ب) التيار خلال المقاوم 12-Ω ، (ج) الطاقة المفقودة فى المقاوم 8-Ω .



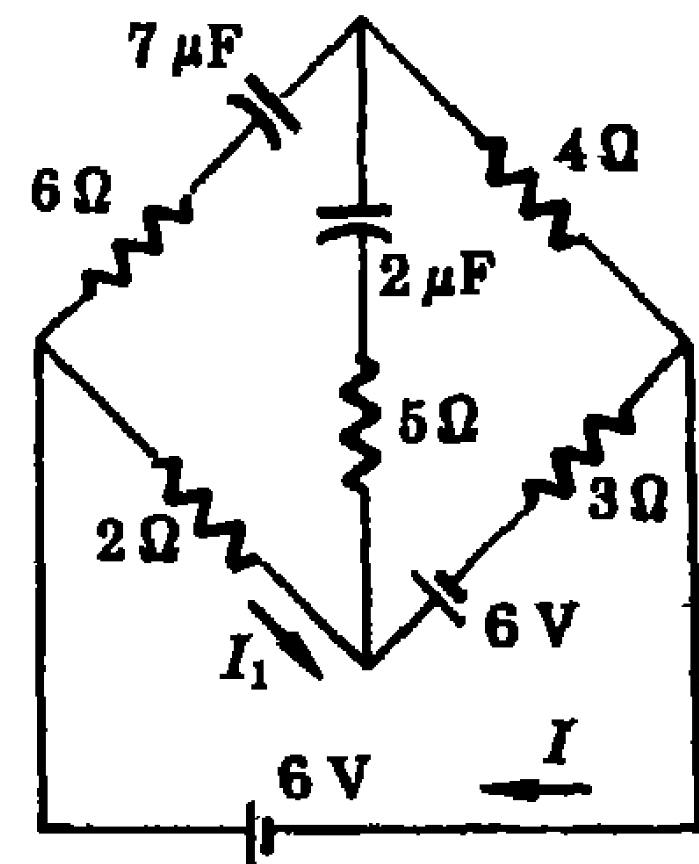
شكل م ١٨ – ٦



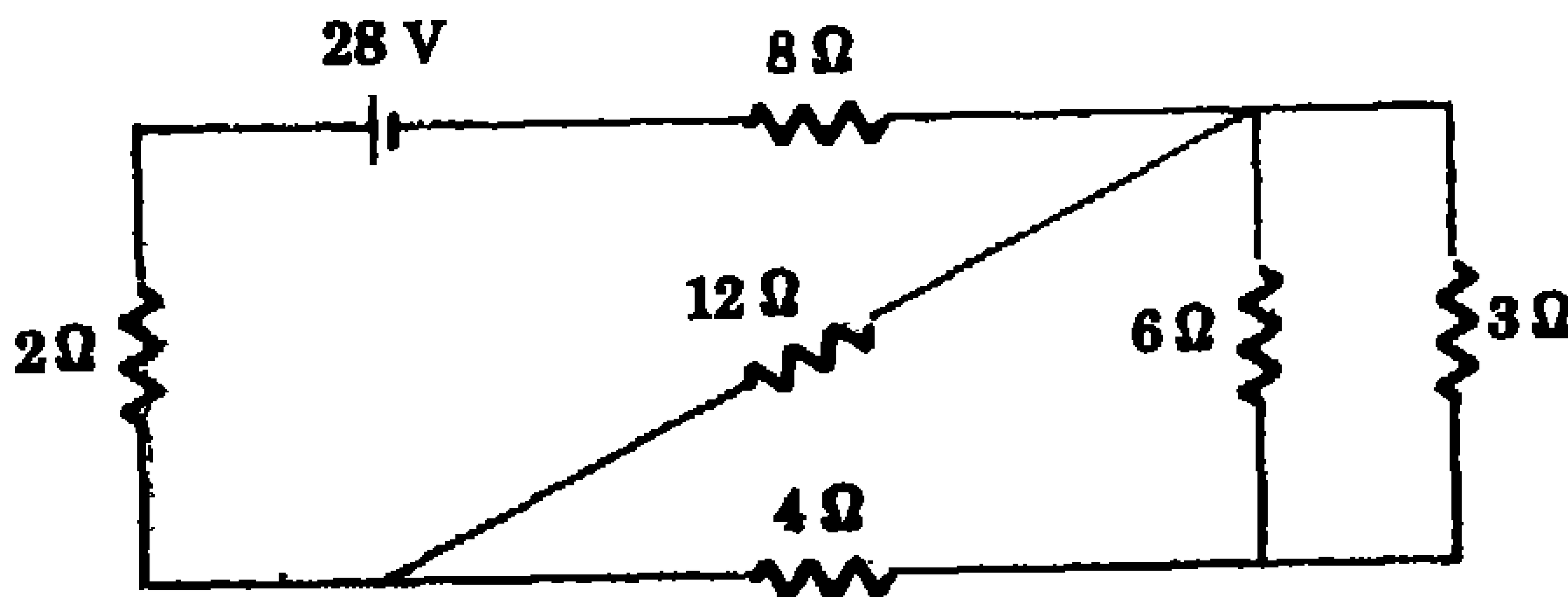
شكل م ١٨ – ٧



شكل م ١٨ – ٨



شكل م ١٨ – ٩



شكل م ١٨ – ١٠

١١ -* ارجع الى الدائرة فى الشكل م ١٨ - ١١ . يقرأ الفولتميتر 5.0 V والاميتر 2.0A حين يمر التيار فى الاتجاه المبين . اوجد (أ) R ، (ب) قيمة ℰ . (لاحظ عند كتابة معادلة الدائرة ان فرق الجهد عبر R هو 5V).

١٢ -* فى الشكل م (١٨ - ١١) ماهى قيمة ℰ الواجبة اذا كان التيار خلال البطارية 6V صفرا وكانت R تساوى 12 Ω ؟

١٣ -* فى الشكل م (١٨ - ١١) ، كم يجب أن تكون (أ) قراءة الأميتر (ب) قراءة الفولتميتر ، اذا كانت ℰ تساوى 20V ، R تساوى 6.0 Ω ؟

١٤ - فى دائرة انارة منزلية خاصة ذات 120 V استعملت الاجهزة التالية : محمصة خبز 1200 W ، مصباح واحد 60W ومكواه لحام 600W ويحترق المصهر اذا أضيىء مصباح 60W آخر . ماهو الحجم التقريبى للمصهر ؟

١٥ - تقرر تشغيل مجفف 1200 W وغسالة يلزمها 360 W ، واربعة مصابيح كل منها 60 W ، وجهاز راديو 40W بحيث تعمل جميعها على نفس الخط 120 V . ماهى القيمة التقريبية للتيار الذى يجب أن يصمم المصهر من أجله ؟

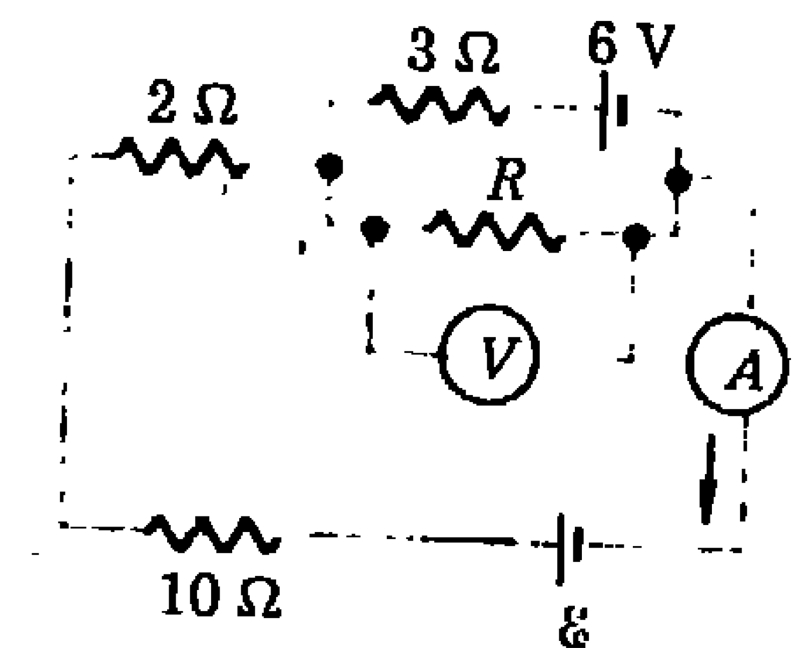
١٦ - يقرأ الأميتر فى شكل م (١٨ - ١٢) تيارا قدره 3.0A اوجد I_1 ، I_2 وكذا قراءة الفولتميتر .

١٧ - كان التيار خلال الأميتر فى الشكل م (١٨ - ١٣) هو 3A فى الاتجاه المبين .

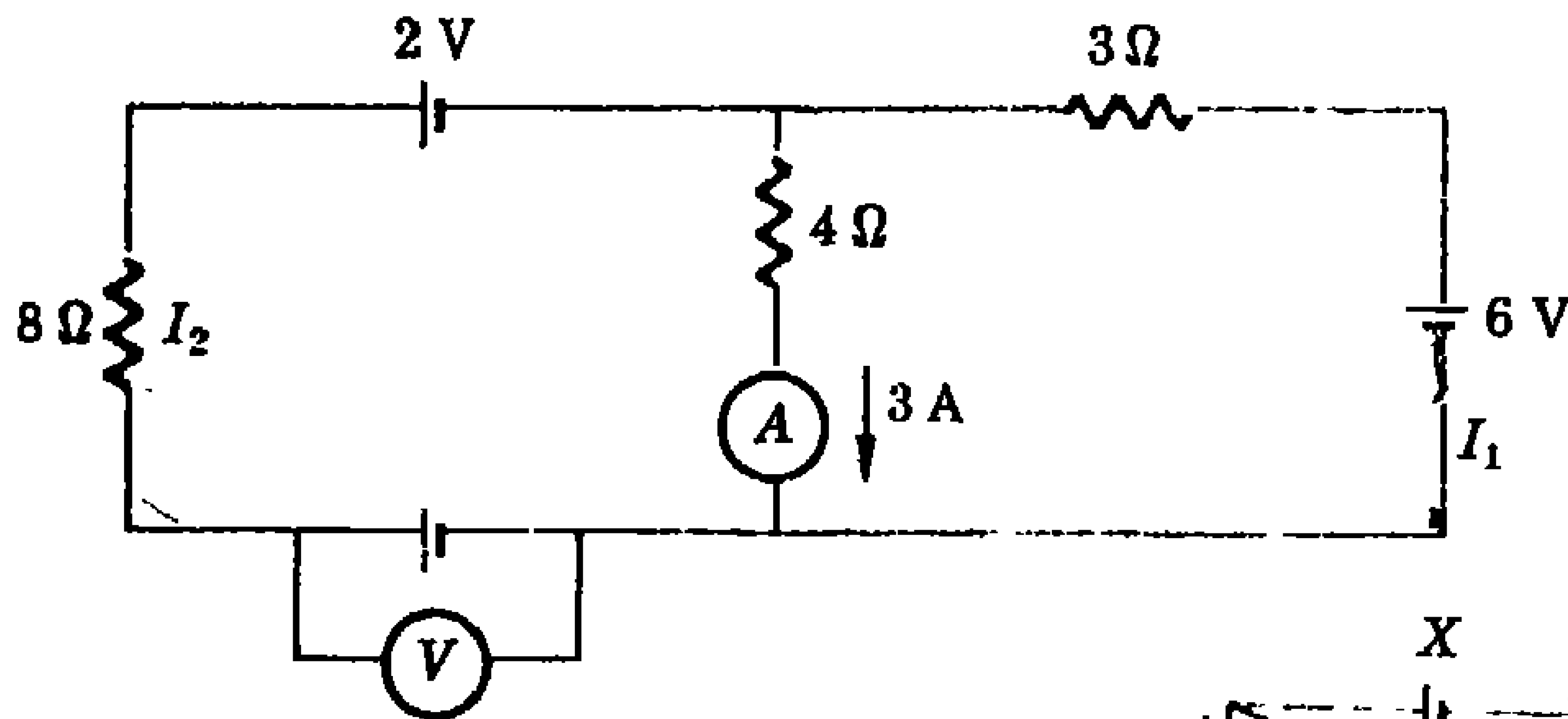
(أ) أوجد ق . د .ك المجهولة ، X والتيارين المجهولين .

(ب) ماهى الشحنة على المكثف ؟ .

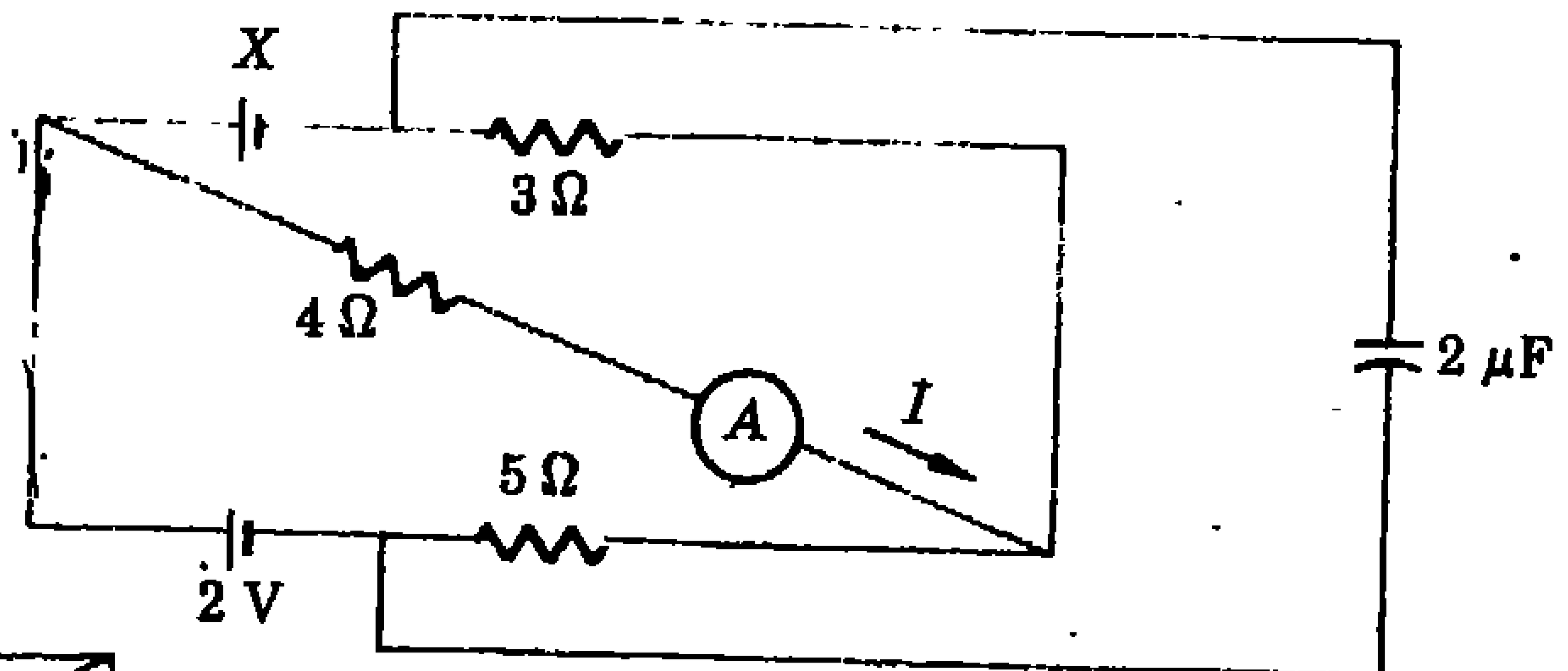
١٨ - اوجد قيم I_1 ، I_2 ، ℰ وكذا الشحنة على المكثف 2-μF فى الشكل م ١٨ - ١٤ .



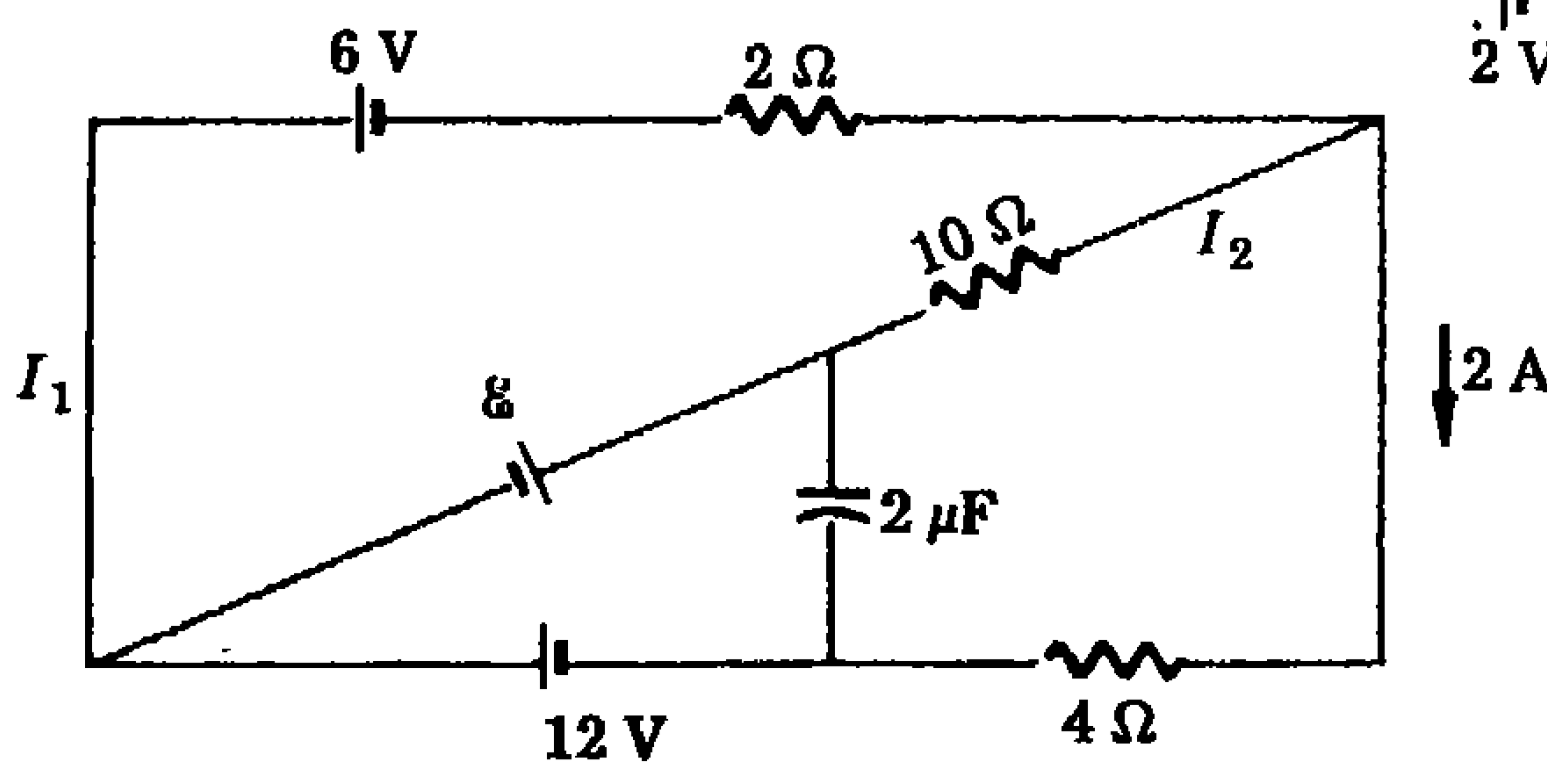
شكل م ١٨ - ١١



شكل م ١٨ - ١٢



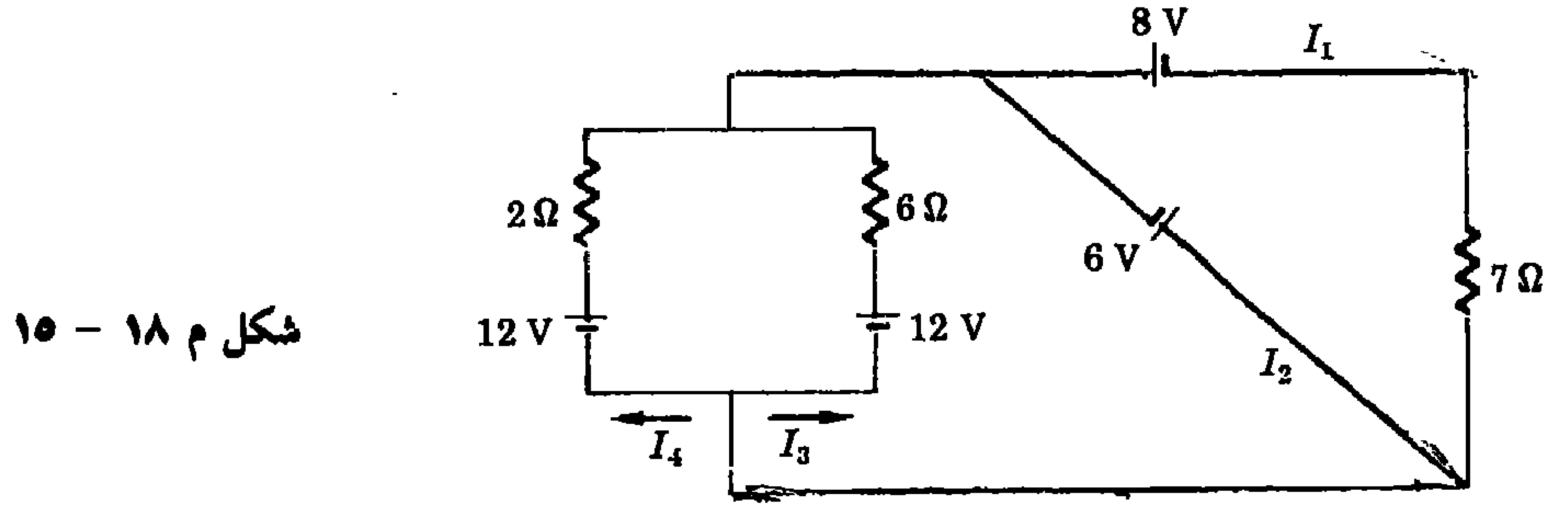
شكل م ١٨ - ١٣



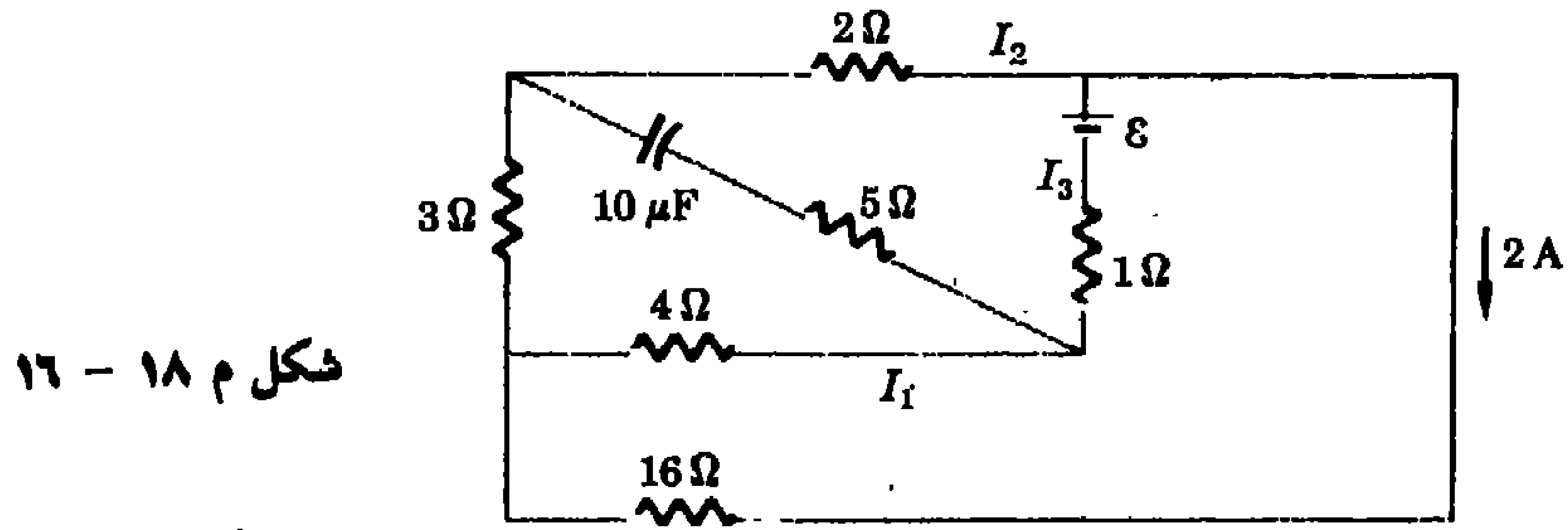
شكل م (١٨ - ١٤)

١٩ – اوجد التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 فى الدائرة المبينة فى شكل م (١٨ – ١٥) .
٢٠ –* فى الشكل م ١٨ – ١٦ اوجد I_1 ، I_2 ، I_3 ، ε والشحنة على المكثف
٢١ –* شحنت المكثفات $2\ \mu F$ ، $4\ \mu F$ كل على حده حتى فرق جهد مقداره 12V عن طريق توصيلهما عبر بطارية كل فى دوره وبعد أن شحنا وصلا ببعضهما البعض بحيث كان اللوحان الموجبان متصلان معا واللوحان السالبان متصلان معا . اوجد (أ) فرق الجهد عبر كل منهما و (ب الشحنة الصافية على كل منهما . تلميح : لاحظ ان فرق الجهد عبر كليهما سيكون هو نفسه بعد توصيلهما معا .
٢٢ – ** كرر المسألة 21 اذا كان المكثفان متصلان معا بحيث كان اللوح الموجب لاحدهما متصل باللوح السالب للآخر .
٢٣ – ** تبلغ قيمة كل مقاوم من التى بالشكل م (١٨ – ١٧) $2\ \Omega$ اوجد المقاومة المكافئة بين A ، B

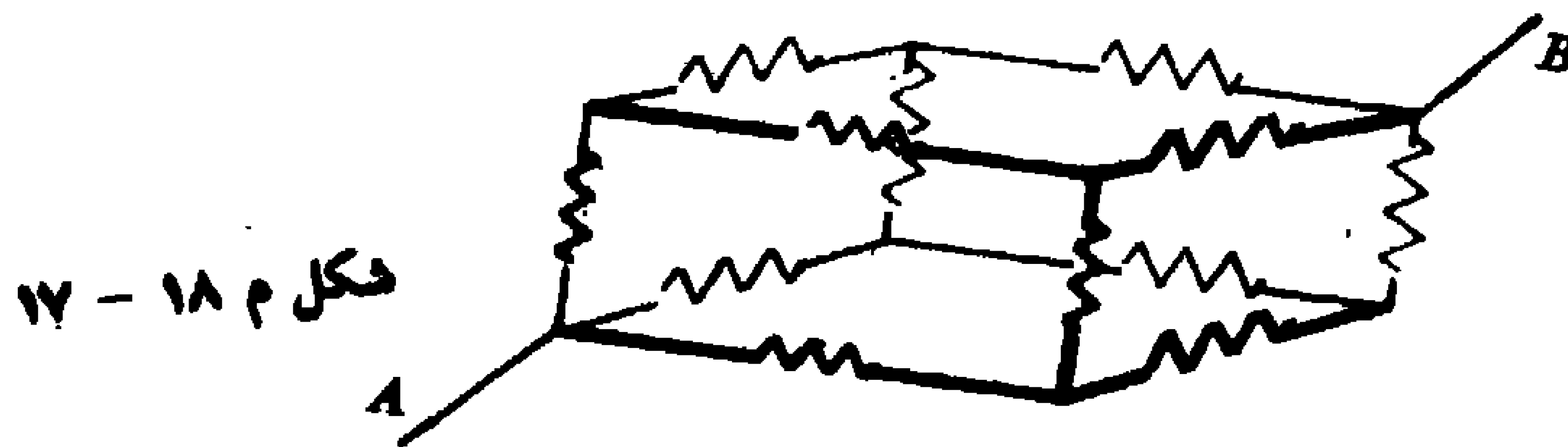
تلميح : من تماثل الشكل يحتوى كثير من الأسلاك على تيارات متماثلة .
٢٤ –* اثبت العلاقة المعطاه فى شكل (١٨ – ١٠) للمكثفات المتصلة على التوازى .
٢٥ –* اثبت العلاقة المعطاه فى شكل ١٨ – ١٠ للمكثفات المتصلة على التوالى .



شكل م ١٨ – ١٥



شكل م ١٨ – ١٦



شكل م ١٨ – ١٧

الفصل التاسع عشر

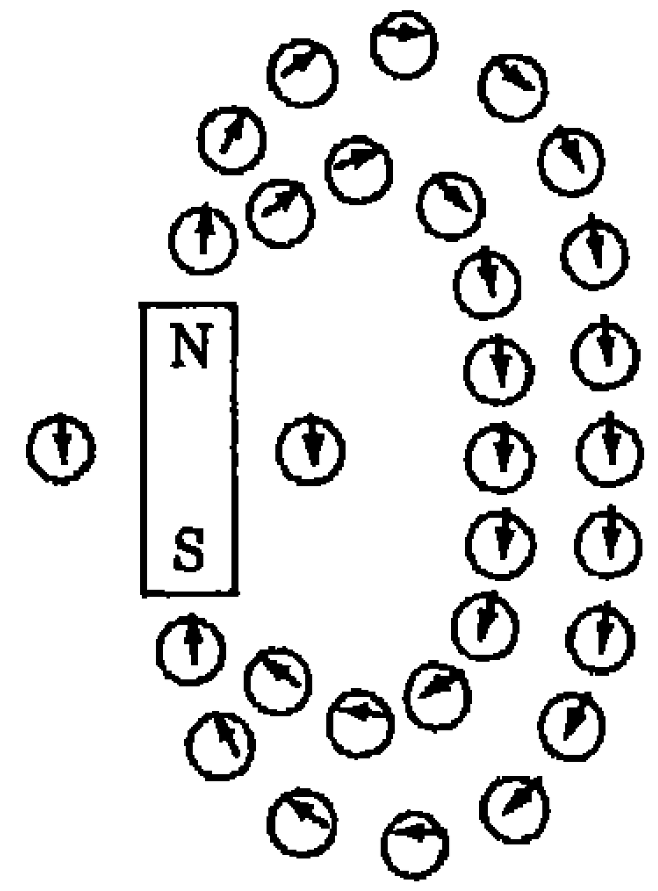
المغناطيسية

لاشك أننا جميعا قد حاولنا فى وقت أو آخر أن نجرى بعض التجارب البسيطة بالمغناطيسات كما نعلم أن لها مجالا مغناطيسيا حولها وأن مواد معينة تقع تحت تأثير قوى حين توضع فى هذا المجال المغناطيسى . فالقطب الشمالى مثلا لأحد المغناطيسات يؤثر بقوة تنافر على القطب الشمالى لمغناطيس آخر موضوع بالقرب منه . وبالعكس تقوم الأقطاب الجنوبية للمغناطيسات بجذب الأقطاب الشمالية لمغناطيسات أخرى . بالإضافة الى هذا تنجذب قطع غير ممغنطة من بعض المواد بشدة (كالحديد مثلا) الى كل من القطبين الشمالى و الجنوبى للمغناطيسات .

على الرغم من أن كثيرا منا قد تعلم هذه الحقائق فى المدارس إلا أن تفسير هذه الحقائق البسيطة على المستوى الجزيئى ليس بسيطا . ولايزال موضوع المغناطيسية مجالا نشطا وشيقا من مجالات البحث حتى يومنا هذا . وستلاحظ فى هذا الفصل والذى يليه أن المغناطيسيه تشكل أهمية لنا فى كثير من النواحى وكلما تقدمنا فى مناقشة الموضع سيصبح أكثر وضوحا أن المغناطيسات وآثارها ليست إلا واجهة ضئيلة للمغناطيسية .

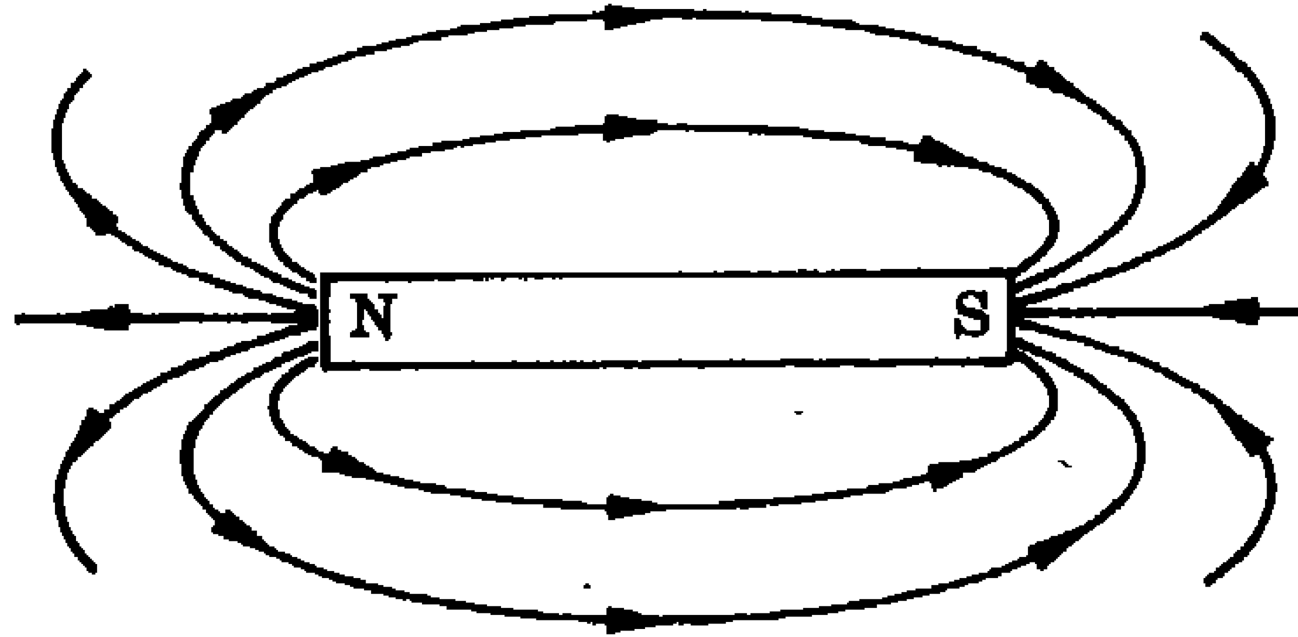
١٩ – ١ تخطيط المجالات المغناطيسية

يتواجد المجال المغناطيسى فى المنطقة المتاخمة للمغناطيس . وكبداية قد نصف المجال المغناطيسى بدلالة تأثيره على إبرة بوصلة . وكما قد تعلم فإبرة البوصلة ليست إلا مغناطيسا صغيرا ، وطرف الإبرة الذى يشير الى الشمال نتيجة للمجال المغناطيسى للكرة الأرضية يسمى **القطب الشمالى** للمغناطيس الإبرى ، وفضلا عن ذلك يعرف المجال المغناطيسى بحيث أن القطب الشمالى لابرة البوصلة يشير الى اتجاه مواز للمجال . إذا أخذنا هذا فى الاعتبار بالإضافة الى حقيقة أن الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب فإنه يصبح من السهل تخطيط المجال المغناطيسى .

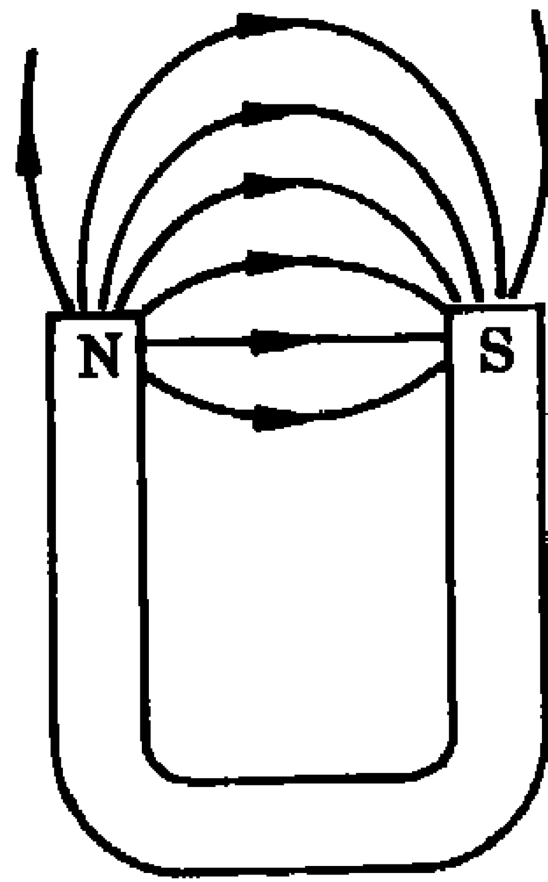


شكل ١٩ – ١
يمكن ايجاد اتجاه المجال المغناطيسى بجوار مغناطيس ما بإستخدام ابرة البوصلة

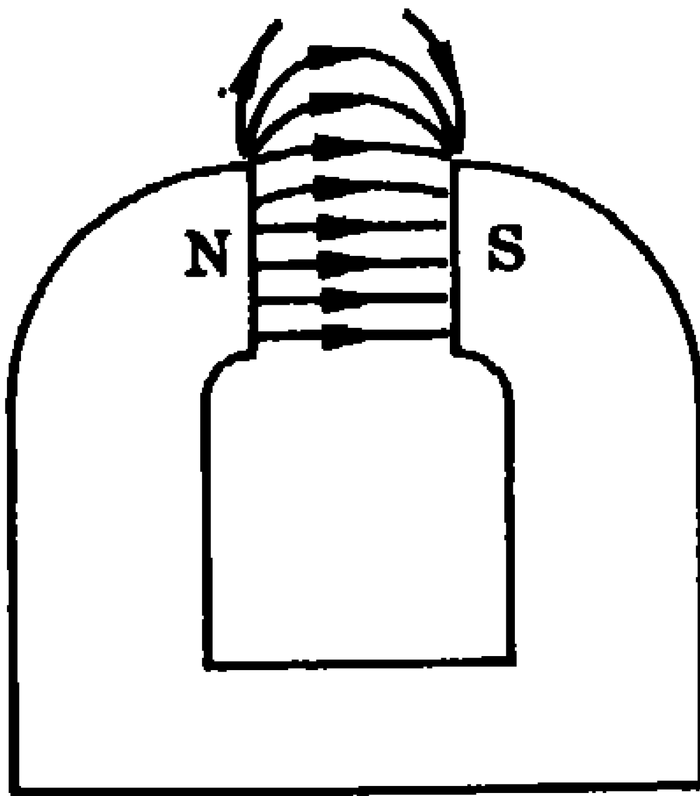
افترض كمثال بسيط اننا نريد تخطيط المجال المغناطيسى حول قضيب مغناطيسى . اذا وضعت بوصلة بجوار المغناطيس فإنها تصطف فى اتجاه المجال المغناطيسى كما يوضح الشكل ١٩ – ١ ، حيث ترى عدة بوصلات . وعليك أن تقنع نفسك أن الاقطاب الشمالية للإبر (رؤوس الأسهم) ستصطف ، كما هو مبين تحت تأثير التنافر مع القطب الشمالى والتجاذب مع القطب الجنوبى للمغناطيس. وتتكون « صورة » المجال المغناطيسى عن طريق رسم سلسلة من الخطوط حول المغناطيس بحيث تبين هذه الخطوط الاتجاه الذى تشير اليه ابرة البوصلة ، وقد تم هذا بالنسبة لقضيب مغناطيسى فى الشكل (١٩ – ٢أ) ، أما المجالات التى تحيط بأنواع أخرى من المغناطيسات فترى فى الاجزاء (ب) و (جـ) فى نفس الشكل . ولاحظ أن المجال



(أ)



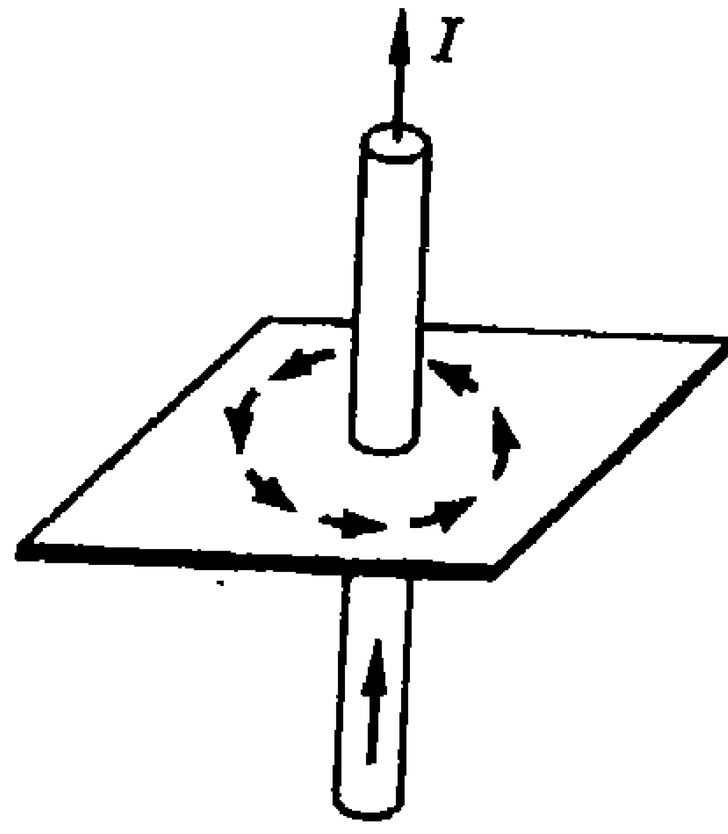
(ب)



(ج)

شكل ١٩ – ٢
يتجه المجال المغناطيسى بعيدا عن القطب الشمالى وداخلا الى القطب الجنوبى

يأخذ الاتجاه الخارج من القطب الشمالي والمقبل على القطب الجنوبي لماذا ؟ (تذكر أن اتجاه المجال عند نقطة مايكون موازيا للاتجاه الذى تشير اليه ابرة البوصلة) .



شكل ١٩ - ٣
يكون المجال المغناطيسى دوائر متحدة المركز مع السلك الذى يحمل التيار .

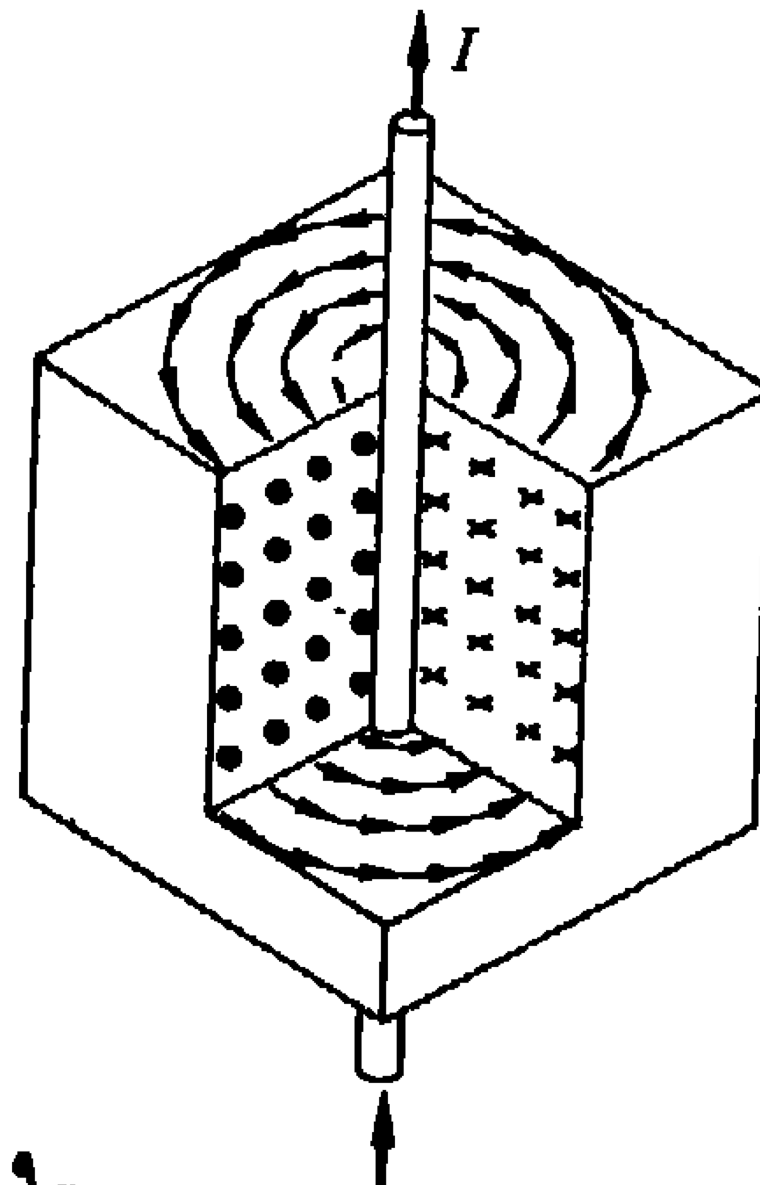
كثير من الملامح الهامة للمجال المغناطيسى يمكن التيقن منها من صور كالموجودة فى الشكل ١٩ - ٢ ، وعلى وجه الخصوص يمكن اعتبار الكثافة النسبية للخطوط فى شكل معين كمقياس لشدة المجال بنفس الطريقة التى استخدمت مع المجالات الكهربائية . ونتيجة لهذا فان خطوط المجال المغناطيسى فى شكل ما ليست فقط صورة لاتجاه المجال وانما تشير أيضا الى قيمته النسبية .

١٩ - ٢ المجالات المغناطيسية للتيارات

ليست المغناطيسات هى المصدر الوحيد للمجالات المغناطيسية ، فقد اكتشف هانزكريستيان اورستد ، عام ١٨٢٠ أنه اذا سرى تيار فى سلك فسينتج عن ذلك انحراف لإبرة بوصلة مجاورة . وقد بين هذا أن التيار المار فى سلك له القدرة على توليد مجال مغناطيسى ونحن نعلم الآن ، من تجارب مختلفة أخرى ، صحة هذا الأمر ، وفضلا عن هذا هناك دلائل على أن المجال المغناطيسى لمغناطيس ما قد يكون أيضا نتيجة لحركات الشحنات .

المجال المغناطيسى لسلك مستقيم

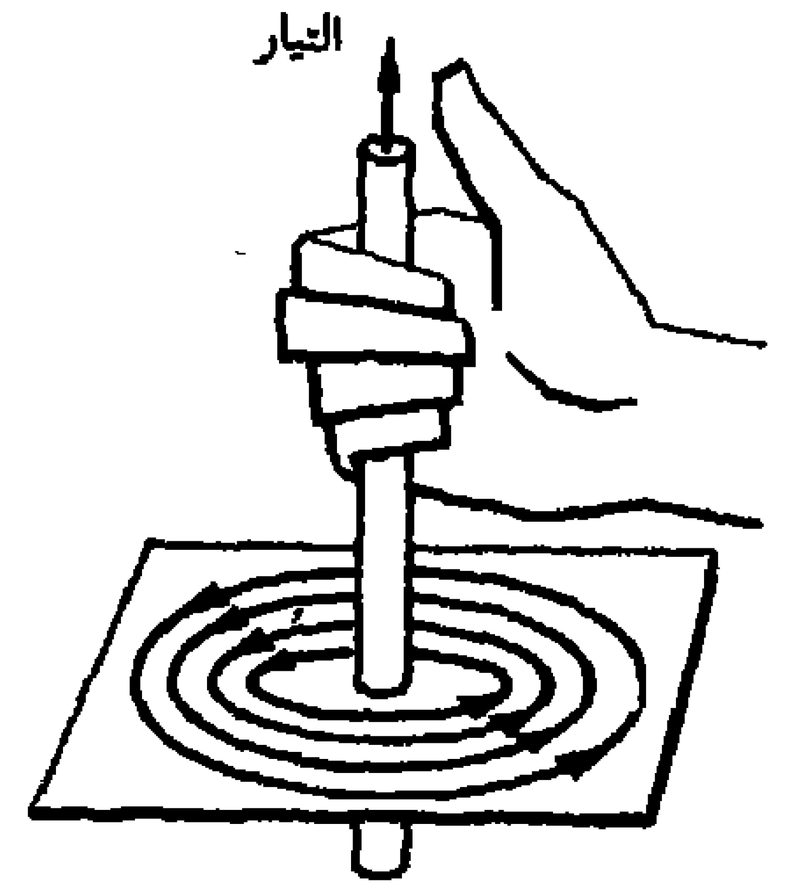
لقد بحث أورستد طبيعة المجال المغناطيسى لسلك مستقيم طويل يحمل تيارا و يبين الشكل ١٩ - ٣ تجربة أورستد . يحمل السلك تيارا فى الاتجاه المشار اليه . عند وضع بوصلة بالقرب من السلك فإن الإبرة تستقر بحيث يكون طولها مماسا لدائرة متحدة المركز مع السلك مما يدل على أن المجال المغناطيسى موجود على هيئة دائرية حول السلك . وكما هو متوقع تبلغ شدة المجال أقصاها بجوار السلك مباشرة . يوضح الشكل ١٩ - ٤ تمثيلا ذا ثلاثة أبعاد للمجال المغناطيسى ، وفى هذا الشكل كما فى الاشكال التالية سيكون رمز النقطة دليلا على أن السهم فى اتجاه القارىء أما الرمز× فتمثل سهما متجها بعيدا عن القارىء وهذان الرمزان عنى بهما الإشارة الى رأس السهم وذيله .



شكل ١٩ - ٤
يدور المجال المغناطيسى حول السلك المستقيم الطويل ويتضاءل هذا المجال عكسيا عند البعد عن السلك

قاعدة اليد اليمنى للمجال المغناطيسى

هناك قاعدة بسيطة تدلنا على اتجاه المجال المغناطيسى حول سلك ماتسمى **قاعدة اليد اليمنى** فلو أننا قبضنا على السلك باليد اليمنى بحيث كان الابهام مشيرا فى اتجاه التيار ، فان الأصابع ستحيط بالسلك مشيرة الى اتجاه المجال . ويوضح الشكل التخطيطى ١٩ — ٥ هذه القاعدة .



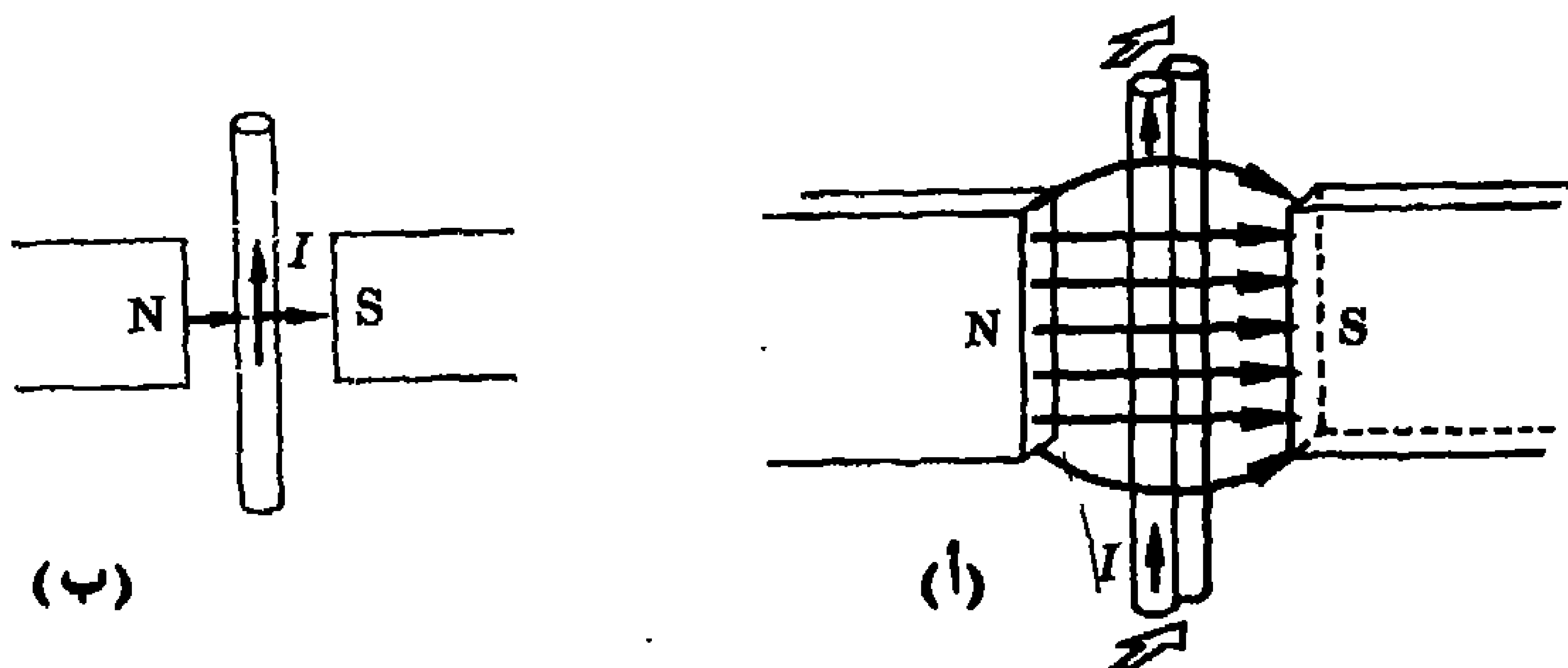
شكل ١٩ — ٥
حين يقبض انسان على السلك بيده اليمنى بحيث يشير الإبهام الى اتجاه التيار فان الأصابع تلتف حول السلك بنفس الطريقة التى يلتف بها المجال .

١٩ — ٣ القوة المؤثرة على تيار فى مجال مغناطيسى

ناقشنا حتى الآن الجوانب الكيفية فقط للمجال المغناطيسى ونود الآن البحث عن وسيلة لقياسه بدقة . ويمكن عمل هذا باستخدام حقيقة أنه اذا وضع سلك يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى فانه يتعرض لقوة . ولبيان هذه الظاهرة فى تجربة نموذجية يوضع سلك بين قطبى مغناطيس كما هو مبين فى الشكل ١٩ — ٦أ وعندما يسرى تيار I خلال السلك فى الاتجاه المشار اليه ، فان السلك يتعرض لقوة تدفعه فى الاتجاه المبين . فإذا عكس اتجاه التيار ينعكس اتجاه القوة المؤثرة على السلك . اذا أعيد رسم الموقف الممثل فى الشكل ١٩ — ٦أ لكى يضبح فى بعدين كما فى الجزء (ب) فاننا نلاحظ أن خط السلك وخط المجال المغناطيسى الذى يقطعه يحددان معا مستوىً واحدا وهو مستوى الصفحة . (تذكر أن تقاطع خطين مستقيمين يحدد مستوى .) وتكون القوة المؤثرة على السلك دائما عمودية على هذا المستوى وسنعود قريبا الى هذه القاعدة .

متجه المجال المغناطيسى B

يعتمد مقدار القوة F المؤثرة على السلك على عدة عوامل . وبالرجوع الى التجربة يمكننا فصل كل عامل على حده ثم تحديد العلاقات بين العوامل بدقة . لقد وجد أن القوة تتناسب طرديا مع كل من التيار I فى السلك وطول السلك L الموجود فى المجال المغناطيسى فحين يتضاعف التيار تتضاعف تبعا لذلك القوة . سنختار **تعريفا للمجال المغناطيسى بدلالة متجه B له اتجاه عند نقطة ما مطابق لاتجاه المجال الغناطيسى عند تلك النقطة . ومقدار B سيعتبر متناسبا مع القوة التى يتعرض لها السلك الذى يحمل تيارا وهو بالمجال .** ومن ثم فإن القوة التى



شكل ١٩ — ٦
يقوم المجال المغناطيسى بتعريض السلك لقوة وفى الجزء (ب) تتجه هذه القوة الى داخل الصفحة

تؤثر على سلك طوله L يحمل تيارا قدره I فى مجال مغناطيسى شدته B يعطى بالعلاقة :

$$F \propto BIL$$

على أن هناك بعض المضاعفات ، فعندما يكون السلك على خط واحد مع المجال كما هو مبين فى شكل (١٩ — ٧أ) ، فإن القوة المؤثرة عليه تكون صفرا . وقد بينت تجارب أخرى أن القوة المؤثرة على السلك تتناسب مع مركبة **B** المتعامدة مع السلك ، وهذه المركبة وهى $B_\perp$ موضحة فى الشكل ١٩ — ٧ب .

القوة المغناطيسية المؤثرة على التيار

سنعرف وحدات شدة المجال B بحيث تكون القوة المؤثرة على السلك هى :

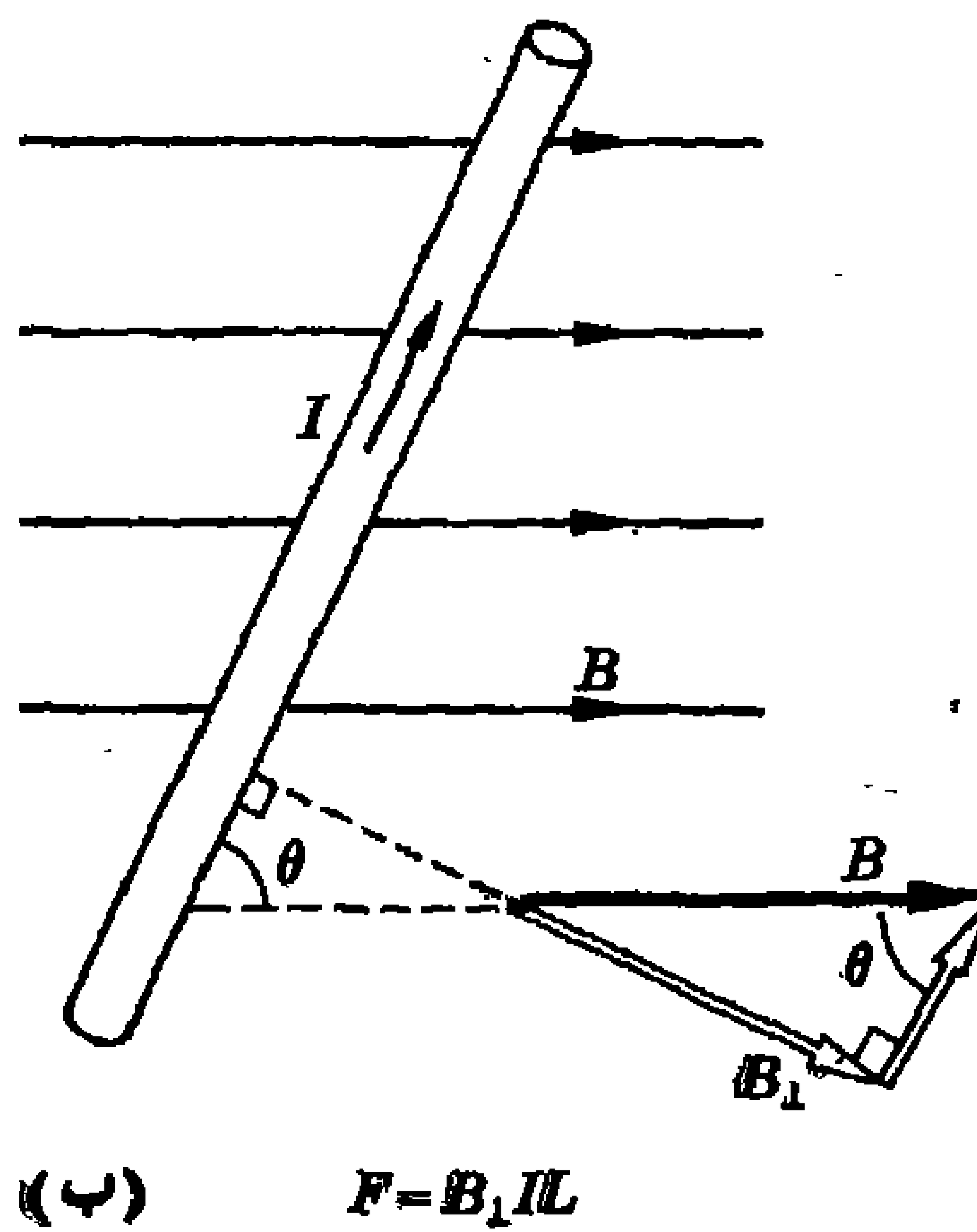
$$F = B_\perp IL \qquad (١٩ - ١)$$

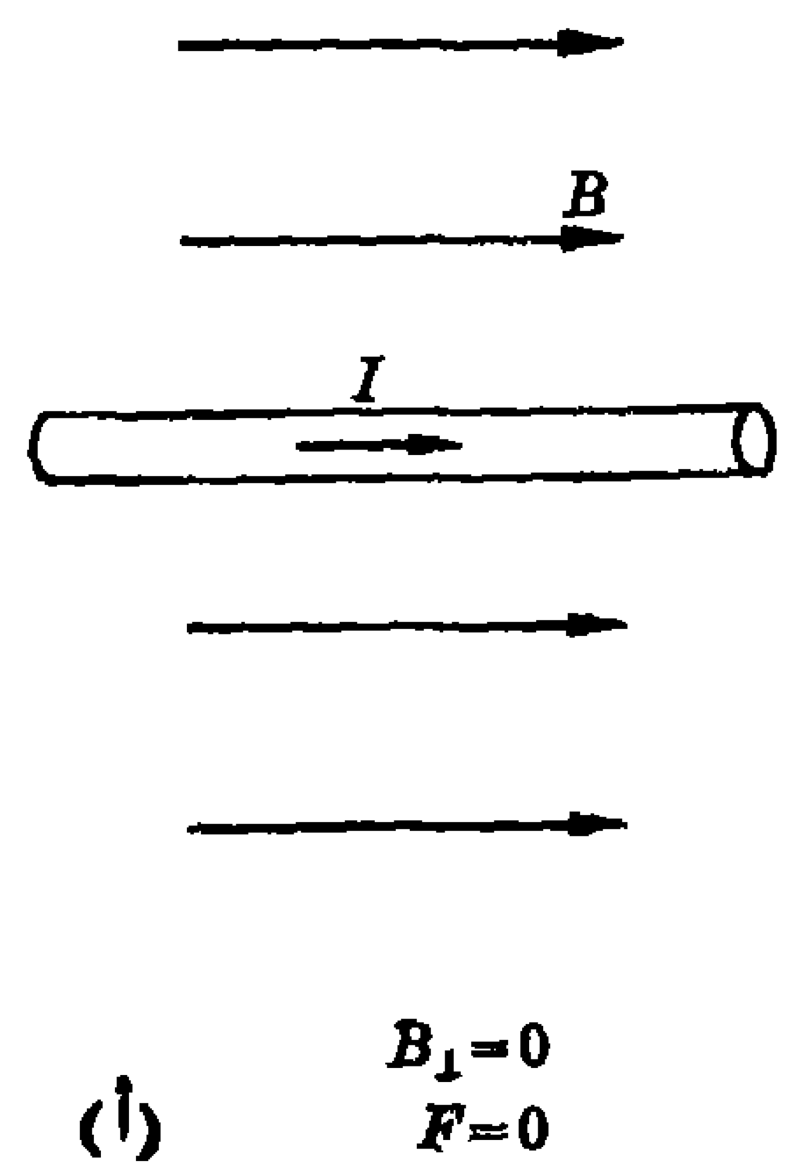
وكل من له صديق يحمل هذا الاسم (BIL) لن يجد صعوبة فى تذكر هذه المعادلة مع ملاحظة أن $B_\perp$ ليست الا $B \sin\theta$ ، حيث θ هى الزاوية المبينة فى الشكل ١٩ — ٧ب

إن الوحدات المعرفة فى المعادلة (١٩ — ١) للكمية B هى (Wb/m^2) وتسمى أيضا weber/m^2 ، tesla (T)

اسم ووحدات B

وسنستخدم كلتا التسميتين بالتناوب ، وهذه الوحدة هى N/(A) (m) حسب المعادلة (١٩ — ١) فكالمعتاد F مقاسه بوحدات newtons ، I بوحدات amperes أما L فمقاسه بوحدات meter وقد كنا نود أن نطلق على B اسم شدة





شكل ١٩ — ٧
تتناسب القوة المؤثرة على سلك يحمل تيارا مع مركبة B التى تتعامد مع السلك

المجال المغناطيسي ، الا أن هذا الاسم محجوز لكمية أخرى ، على أن هناك العديد من الأسماء التى تطلق على B واكثرها قبولا هى **كثافة التدفق والحث المغناطيسى** ويشار دائما الى هذه الكمية باللغة الدارجة على أنها **شدة المجال المغناطيسى**

وهناك وحدة أخرى تستعمل للتعبير عن B وهى gauss (G) ، وهى وحدة أصغر بكثير عن وحدة weber/square meter اذ أن العلاقة بينهما هى $10^4 G = 1 wb/m^2$. وليست وحدة gauss عضوا فى عائلة وحدات SI ولذا فلن نستخدمها فى معادلاتنا

مثال توضيحى ١٩ — ١ : اوجد القوة المؤثرة على طول قدره 300cm من السلك المبين فى الشكل ١٩ — ٧ ب اذا كانت $\theta = 53°$ والتيار 20A أما B فكانت 2.0G

طريقة الحل : ان قيمة $B_\perp$ تبلغ $0.8B$، ومن ثم باستخدام المعادلة (١٩ — ١) نجد

$$F = [(2 \times 10^{-4}\ T)(0.8)](20\ A)(3.0\ m) = 0.0096\ N$$

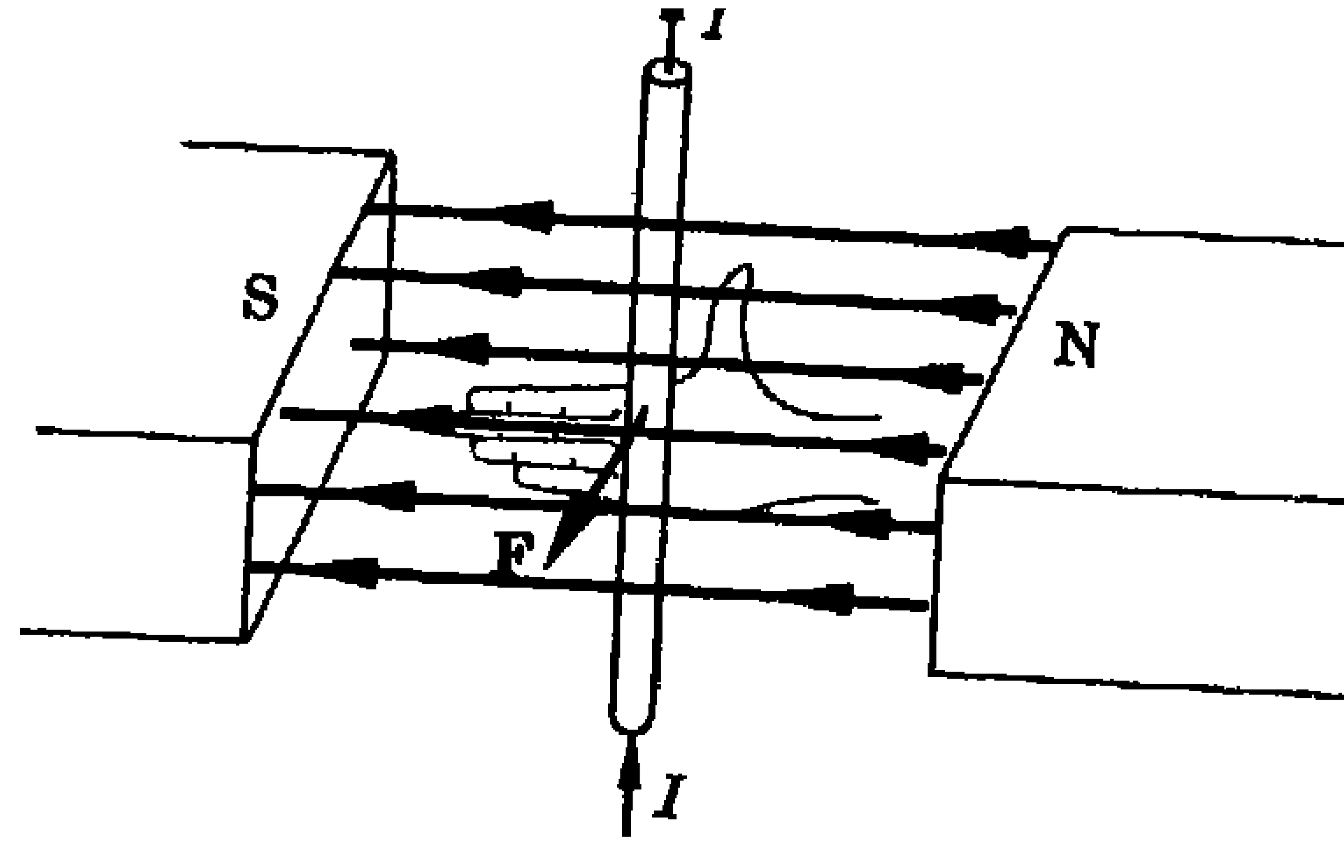
ولما كان gauss ، cm ليسا من واحدات SI الصحيحة فقد استبدل بهما tesla و meter على الترتيب . وسنعود فى القسم التالى بتعلم كيفية ايجاد اتجاه القوة .

١٩ — ٤ امتداد قاعدة اليد اليمنى

بينا فى القسم السابق أن اتجاه القوة التى يتعرض لها سلك يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى يكون عموديا على المستوى الذى يتحدد بكل من السلك والمجال . سنقوم الآن بدراسة امتداد بديهى بسيط لقاعدة اليد اليمنى (المذكورة فى القسم ١٩ — ٢) مما يتيح لنا أن نعرف اتجاه القوة التى يتعرض لها السلك . وهى فى الحقيقة ليست إلا وسيلة بديهية محضة لتذكر اتجاه القوة ولايجب الصاق أى معنى فيزيائى بهذه القاعدة لأنها ببساطة قاعدة ذهنية .

قاعدة اليد اليمنى للقوة المغناطيسية

يوضح الشكل ١٩ — ٨ هذه القاعدة . باستعمال اليد اليمنى نجد ان أصابع اليد المفتوحة ستشير فى اتجاه خطوط المجال المغناطيسى وتثبت اليد بحيث يكون الابهام مشيرا الى الاتجاه الذى يسرى فيه التيار داخل السلك . وحين يتم هذا سيكون اتجاه القوة المؤثرة على السلك هو الذى تدفع اليه راحة اليد . فى الموقف الموضح فى شكل ١٩ — ٨ تشير أصابع اليد اليمنى الى اليسار ، ويتجه الإبهام الى أعلى أما القوة المؤثرة على السلك فتتجه خارجة من الصفحة .



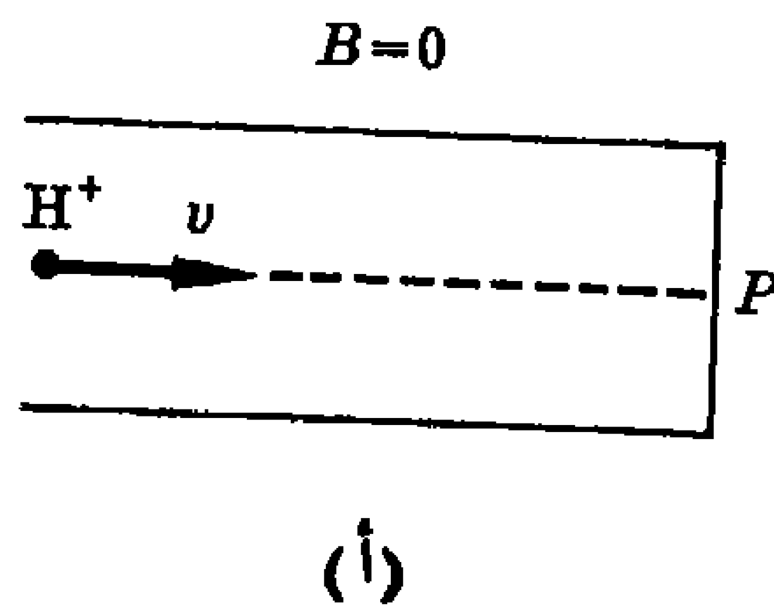
شكل ١٩ – ٨
عند استخدام قاعدة اليد اليمنى تشير الأصابع فى اتجاه B ويشير الابهام فى الاتجاه العام للتيار I ، أما راحة اليد فتدفع فى اتجاه F

لايجب أن يكون فى هذا الامر أى خلط . فخط متجه المجال B وخط السلك يحددان معا مستوى (وهو مستوى الصفحة فى حالة الشكل ١٩ – ٨) وتكون القوة دائما عمودية على هذا المستوى وطالما عرفت هذا فان التخمين الصرف يتيح لك فرصة مقدارها خمسون فى المائة لكى تحصل على الاتجاه الصحيح للقوة التى إما أن تكون خارجة أو داخلة من أحد جوانب المستوى . لمعرفة الاختيار الصحيح ، استعمل القاعدة المبينة فى شكل ١٩ – ٨ . اتجاه القوة فى الشكل ١٩ –٨ يكون نحو القارىء ، اى خارجا من الصفحة . باستخدام نفس القاعدة نجد أن اتجاه القوة فى الشكل ١٩ – ٧ يكون الى داخل الصفحة .

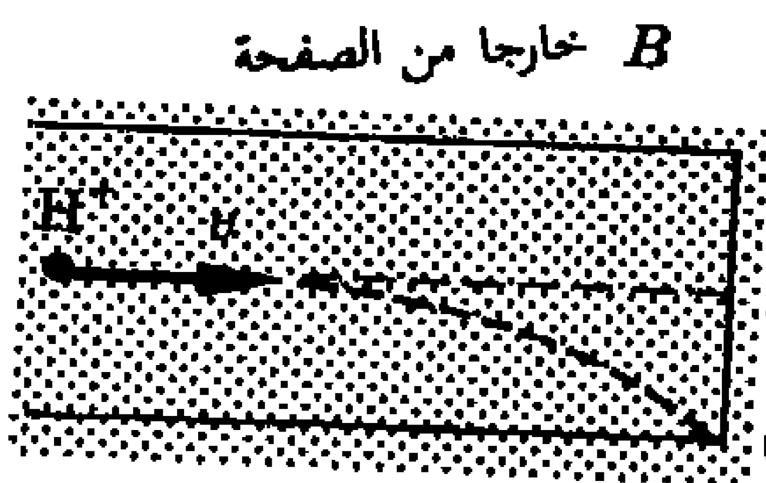
شكل ١٩ – ٩
تتبع البروتونات قوسا من دائرة حين تنحرف فى مجال مغناطيسى منتظم ، فى (ب) تشير النقط الى أن B يتجه خارجا من الصفحة

١٩ – ٥ القوى المؤثرة على شحنات متحركة

ان التيار الكهربائى هو نتيجة لحركة الجسيمات المشحونة ، والسلك الذى يحمل تيارا يتعرض لقوة فى مجال مغناطيسى . فهل من الضرورى ، حقيقة ، أن توجد هذه الجسيمات داخل السلك حتى يتعرض لتلك القوة من جانب المجال المغناطيسى ؟ وعلى مايبدو فلو أن القوة أثرت مباشرة على ناقلات الشحنة ، لتعرضت هذه لقوة حتى فى حيز مفتوح فى منطقة يوجد فيها مجال مغناطيسى . والحقيقة ان هذا مايحدث فعلا .



(أ)



(ب)

لو أن جسيما موجب الشحنة مثل نواة الايدروجين اى البروتون عجل خلال فرق للجهد داخل انبوبة زجاجية مفرغة ، فانه ينتقل فى الأنبوبة حتى يصطدم بنهايتها كما هو مبين فى الشكل ١٩ – ٩أ ويمكن رؤية نقطة الإصطدام P كبقعة مضيئة على الزجاج لو أن نهاية الأنبوبة كانت مغطاة بمادة فلورية . (تنتج أنبوبة التليفزيون صورتها عندما تصطدم الالكترونات بستار فلورى عند طرف الرؤية . سنعتبر البروتون موجب الشحنة بدلا من الالكترون سالب الشحنة لأننا قد عرفنا التيار بدلالة سريان الشحنة الموجبة) .

افترض الآن أن القطب الشمالى لمغناطيس قد وضع خلف الأنبوبة بحيث يكون المجال خارجا من الصفحة كما يبين ذلك الشكل ١٩ — ٩ ب (تمثل النقط — كما ذكرنا من قبل — أسهما خارجة فى اتجاهك بينما تمثل الصلبان أسهما مبتعدة) . وسنجد أن البقعة المضيئة عند نهاية الأنبوبة سوف تتحرك الى موضع مثل Q . لقد انحرف البروتون بواسطة المجال المغناطيسى ومن ثم أصبح لدينا برهان عملى على حقيقة أن الجسيم المشحون اذا تحرك فى مجال مغناطيسى فانه يتعرض لقوة .

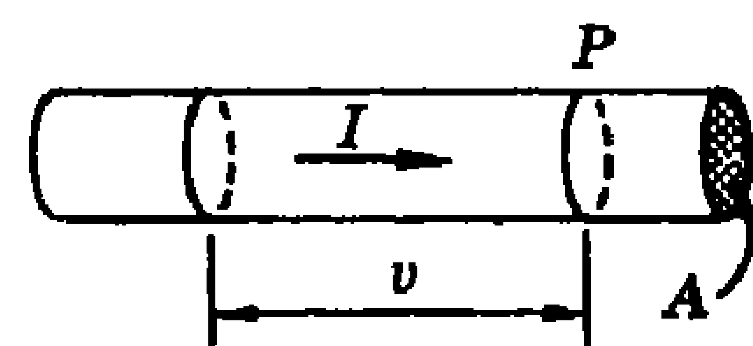
وفضلا عن هذا تكون القوة المؤثرة على جسيم موجب الشحنة متعامدة مع كل من اتجاه المجال واتجاه حركة الجسيم . بفحص الشكل ١٩ — ٩ ب يتبين أن التيار الذى يسرى الى اليمين سينحرف ايضا الى أسفل ، وليس هذا بمستغرب فى ضوء حقيقة ان التيار التقليدى هو سريان للشحنات الموجبة .

اتجاه القوة المغناطيسية شحنات متحركة

اذا أجريت التجربة مرة أخرى ولكن بقذف الكترونات داخل الأنبوبة لوجدنا أن الالكترونات ستنحرف الى أعلى بدلا من أسفل ، أى أن القوة المؤثرة على جسيمات سالبة الشحنة متحركة تكون فى اتجاه معاكس للقوة المؤثرة على جسيمات موجبة . وبناء على ذلك فلا حاجة بنا لتعلم قواعد جديدة لتحديد اتجاه القوى المؤثرة على شحنات متحركة فى مجال مغناطيسى وعلينا فقط أن نعتبر الشحنات المتحركة كتيار يسرى فى اتجاه الحركة ثم نستخدم امتداد قاعدة اليد اليمنى لايجاد اتجاه القوى المؤثرة على التيار . لو كان الجسيم موجبا فانه ينحرف فى نفس الاتجاه ولو كان سالبا لانحرف فى الاتجاه المعاكس .

يمكن ايجاد مقدار القوة المؤثرة على شحنة متحركة مباشرة باستخدام معادلة القوة المؤثرة على تيار ،

$$F_{\text{wire}} = B_{\perp} IL$$



شكل ١٩ — ١٠
ستمر كل الشحنات فى الطول v خلال المساحة عند P فى ثانية واحدة

اعتبر الآن السلك المبين فى شكل ١٩ — ١٠ يسرى التيار I الى اليمين ويمكننا اعتبار التيار على أنه حركة الجسيمات موجبة الشحنة . لكل جسيم شحنة مقدارها q وسرعة متوسطة v ،كم من الشحنات سيمر بالنقطة P مخترقا المساحة المعطاة فى الثانية ؟

ستقوم كل شحنة حرة على بعد v الى اليسار من p بالوصول الى P فى ثانية واحدة 1s (تذكر أن v هى المسافة المقطوعة فى ثانية واحدة) . لو كان هناك n شحنة حره فى الطول v من السلك ، فإن n من الشحنات سوف تمر بالنقطة p فى 1s . ولكن حسب تعريف التيار على انه الشحنة المارة بنقطة فى الثانية نجد أن

$$I = nq$$

ولكن القوة المؤثرة على هذه الشحنات n ستكون هي بالضبط القوة المؤثرة على ذلك الطول من السلك الذى يحتوى عليها ، والطول L محل السؤال هو بالضبط v فى المقدار وذلك لان الشحنات تنتقل مسافة قدرها v فى الثانية . وعلى هذا

$$F_{\text{charge}} = \frac{F_{\text{wire}}}{n} = \frac{B_{\perp}IL}{n}$$

أو ، بعد التعويض عن قيمة I ، L

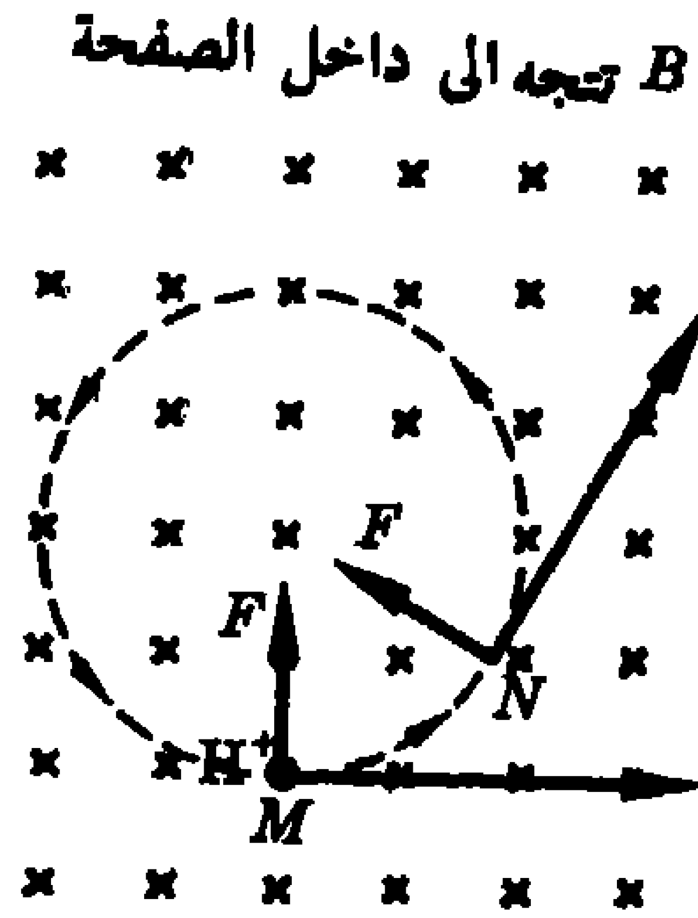
القوة المؤثرة على شحنة متحركة

$$F_{\text{charge}} = B_{\perp}qv$$

تذكر أن هذه القوة عمودية على اتجاه الحركة وكذا على اتجاه B وتذكر أيضا أن $B_{\perp}$ هى مركبة B العمودية على v

مثال توضيحى ١٩ – ٢ : بروتون متحرك بسرعة 10^3 m/s يدخل منطقة يكون فيها المجال المغناطيسى $B = 0.020$T فاذا كانت B, v ، متعامدتين فصف حركة البروتون .

طريقة الحل : يوضح الشكل ١٩ – ١١ الموقف المذكور . حين يكون الجسيم عند النقطة M فإن القوة تكون فى الاتجاه المبين ، أى أن البروتون ينحرف الى أعلى ، ولكنه حين يصل الى النقطة N تكون القوة أيضا عمودية على v وتأخذ الآن اتجاها جديدا كما هو موضح . من الواضح أن القوة F ستجبر الجسيم على الحركة فى مسار دائرى نصف قطره r . اذا قذف جسيم مشحون عموديا على مجال مغناطيسى منتظم فانه يتبع مسارا دائريا . وبما أن القوة تكون دائما عمودية على v فلا شغل يبذل على الجسيم لأن الحركة لن تكون ابدا فى اتجاه القوة .



شكل ١٩ – ١١
ينحرف البروتون فى مسار دائرى بواسطة المجال المغناطيسى .

تقوم القوة المغناطيسية F بتوفير تسارع الجذب المركزى المطلوب للامساك بالبروتون فى مسار دائرى . وتكون معادلتنا لهذه المسألة هى : $F = ma$

القوة المغناطيسية = (الكتلة) (تسارع الجذب المركزى) .

$$B_{\perp}qv = \frac{mv^2}{r}$$

وباستخدام الأرقام المعطاه يمكننا ايجاد نصف قطر المسار r فيكون لدينا

$$r = \frac{mv}{B_{\perp}q} = \frac{(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})(10^5\ \text{m/s})}{(0.020\ \text{Wb/m}^2)(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})} = 5.2 \times 10^{-2}\ \text{m}$$

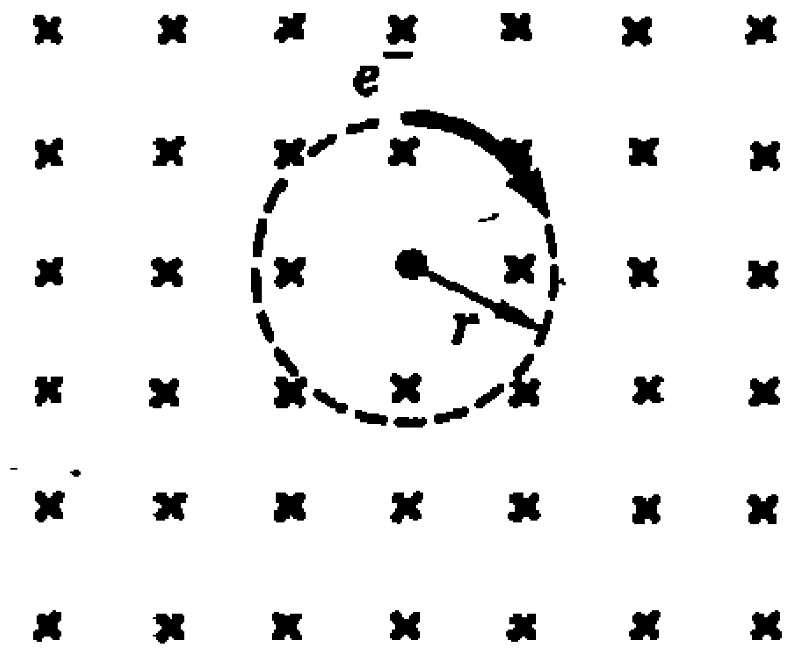
أو

$$r = 5.2\ \text{cm}$$

ماهو فرق الجهد الذى انحدر فيه هذا البروتون ؟ ماهو المسار الذى يمكن أن يسلكه الكترون بدلا من البروتون ؟

١٩ – ٦ تعيين e/m

ناقشنا فى القسم السابق حركة جسيم مشحون فى مجال مغناطيسى . ومن أهم المعلومات المتعلقة بطبيعة الالكترونات ماأمكن الحصول عليه بملاحظة حركتها فى مجال مغناطيسى . ولنوضح مبادىء القسم السابق بمحاولة معرفة كيف يمكن تعيين النسبة بين شحنة الالكترون e وكتلته m .



شكل ١٩ – ١٢
ينحرف الالكترون وهو سالب الشحنة فى اتجاه معاكس للذلك الذى تنحرف فيه شحنة موجبة

افترض أن الكترونا يتحرك بسرعة v قد دخل مجالا مغناطيسيا كالمبين فى الشكل ١٩ – ١٢ سيقوم الالكترون بوصف مسار دائرى كما رأينا من قبل . لاحظ أنه حيث أن الجسيم سالب الشحنة ، فإن الدائرة التى يتحرك فيها الالكترون ليست كالتى يتحرك فيها البروتون كما فى الشكل ١٩ – ١١ . ولما كانت القوة المغناطيسية Bev هى التى تخلق تسارع الجذب المركزى لذا يمكننا أن نكتب :

$$Bev = m\frac{v^2}{r}$$

أو

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} \qquad ١٩ - ٣$$

وبهذا يكون لدينا وسيلة لتعيين النسبة e/m عمليا . باستخدام الطرق الموصوفة فيما بعد فإن شدة المجال المغناطيسى B يمكن قياسها مثلما يمكن قياس نصف قطر المسار الدائرى الذى يصفه الالكترون ، فاذا علمت v فإن e/m يمكن حسابها . ويمكن جعل مسار الجسيمات المشحونة مرئيا بعدد من الطرق وأحد هذه الطرق هو أن تكون هناك جزيئات هواء بداخل الانبوبة تحت ضغط منخفض جدا . ستصطدم بعض الجسيمات فى الشعاع مع جزيئات الهواء وكما سترى فى الباب السابع والعشرين سينطلق ضوء نتيجة للتصادمات ويصبح المسار الدائرى لشعاع الجسيمات مرئيا على هيئة حلقة دائرية من الضوء ويمكن عندها قياس قطر هذه الحلقة بسهولة .

هناك طريقتان أساسيتان لقياس v . تعتمد أولى هذه الطرق على حقيقة أن الجسيم المشحون يكتسب طاقة مقدارها Vq حين ينحدر خلال فرق للجهد مقداره V ، ومن ثم اذا عرفنا فرق الجهد الذى يتسارع فيه الالكترون منذ البداية فانه يمكننا أن نكتب

$$Ve = \tfrac{1}{2} mv^2 \qquad \text{أو} \qquad v = \sqrt{\frac{2Ve}{m}}$$

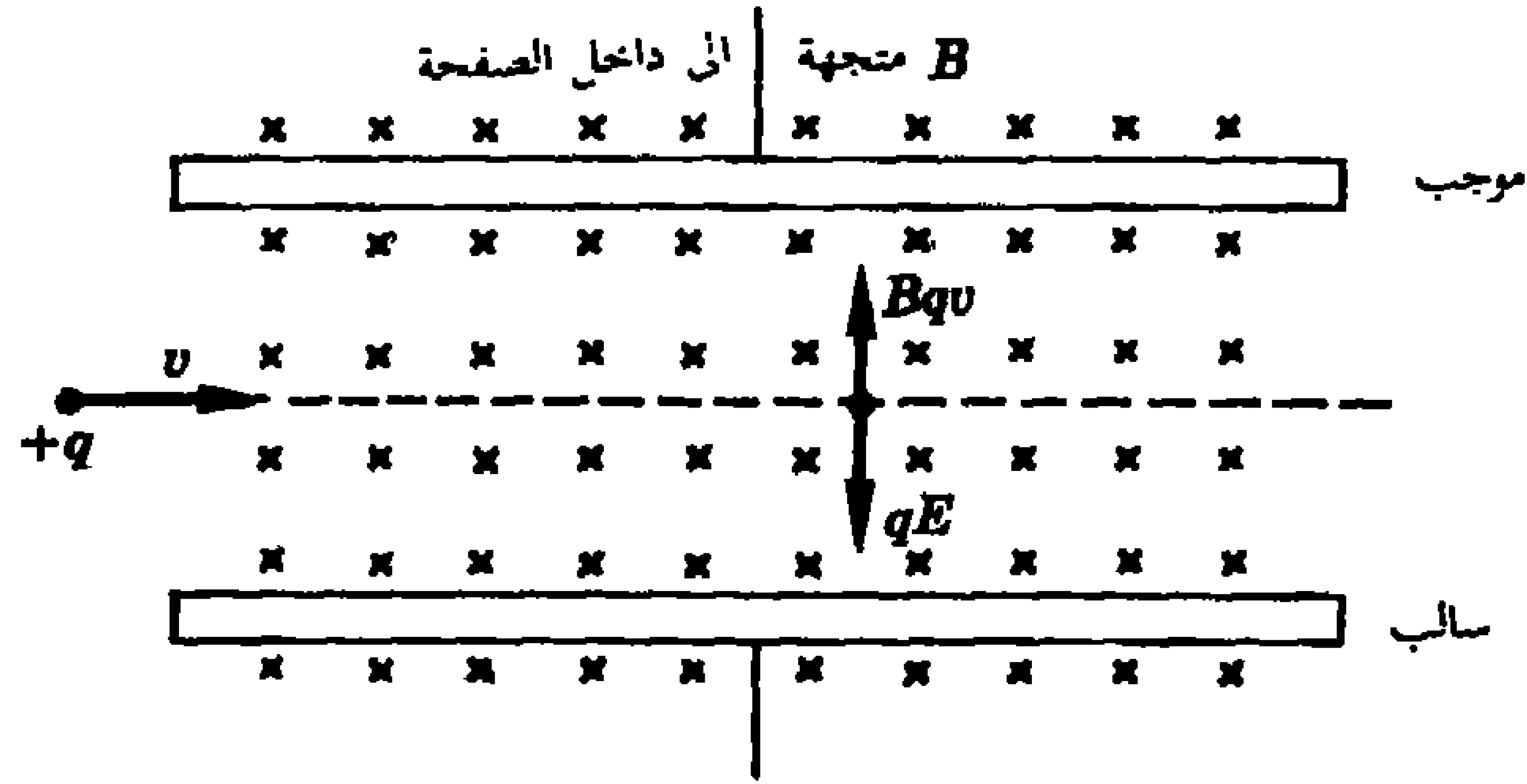
وبالتعويض منها فى المعادلة (١٩ – ٣) نحصل بعد التبسيط على .

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$$

لاحظ اننا نحتاج الآن الى فرق الجهد V التى تتسارع فيه الالكترونات بالاضافة الى قيمة r/B لكى نقدر قيمة النسبة e/m للالكترون التى وجد انها تساوى 1.7588×10^{11} C/kg.

هناك طريقة أخرى أكثر دقة لقياس السرعة يستخدم فيها **منتقى السرعات** للجسيم وهذا الجهاز موضح تخطيطيا فى الشكل ١٩ – ١٣ . يقوم لوحان متوازيان لمكثف بتوليد مجال كهربائى E يؤثر بقوة qE الى أسفل على الجسيم الموجب كما هو مبين . ويقوم المجال المغناطيسى المبين B أيضا بالتأثير بقوة الى أعلى على نفس الجسيم الموجب وهذه القوة هى Bqv، فاذا ضبط فرق الجهد عبر اللوحين بشكل صحيح فان مقدار E يكون بحيث أن :

$$Bqv = qE$$



شكل ١٩ – ١٣
فى جهاز منتقى السرعات لاتمر بدون انحراف سوى الجسيمات التى تكون القوة الكهربائية qE، لها مساوية للقوة المغناطيسية Bqv

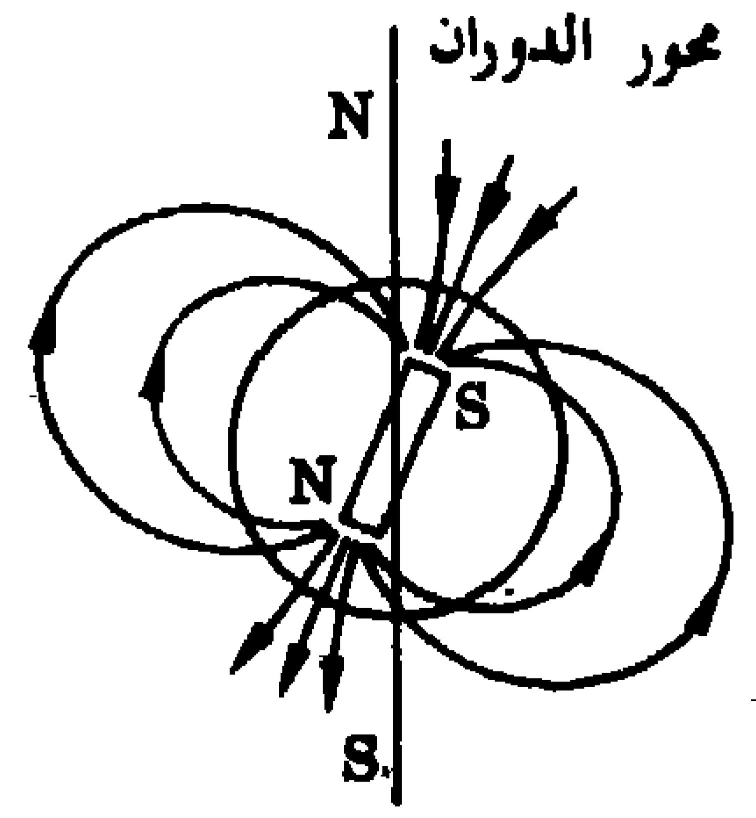
بحيث أن الجسيم لاينحرف . واذا حللنا المعادلة سعيا وراء v فان

$$v = \frac{E}{B}$$

لتعيين سرعة الجسيم v نحتاج الى ضبط فرق الجهد V على الالواح حتى يمر الجسيم بدون انحراف خلال المجالين المتقاطعين الكهربائى والمغناطيسى . بمعرفة $E = V/d$ ، حيث d هى المسافة بين اللوحين فإن v يمكن حسابها من العلاقة السابقة . إذا عرفت v فإن تجربة واحدة يتم فيها انحراف الجسيم فى مجال مغناطيسى فقط سوف تسمح بحساب q/m من المعادلة (١٩ – ٣). هل يمكنك اثبات أن المناقشة السابقة لمنتقى السرعات باستخدام شحنات موجبة تنطبق بنفس الطريقة على الالكترونات ؟

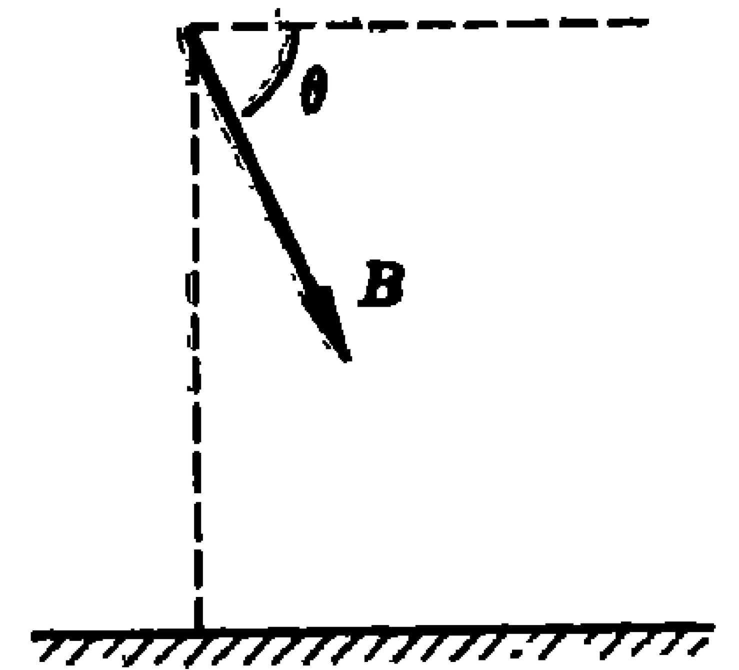
١٩ - ٧ : المجال المغناطيسى للأرض :

ان بعضا من التجارب التى وصفت فى القسم السابق يعمل على تعقيدها كون الارض تمثل مغناطيسا هائلا ويوضح شكل ١٩ - ١٤ المجال المغناطيسى لها ، ويمكن فقط على وجه التقريب تحديد موقع الاقطاب داخل الأرض وهى مبينة فى الشكل للتوضيح . وتلاحظ هنا على وجه الخصوص أن الأقطاب الجغرافية ، حسبما يحددها محور دوران الأرض ، لاتنطبق مع الأقطاب المغناطيسية . كيف يمكن تحديد موضع القطب المغناطيسى عند الطرف الشمالى للأرض ؟ تستخدم بوصلة يكون قطبها الشمالى - حسب التعريف - هو طرف الابرة الذى يشير الى الشمال وعلى هذا فان القطب الموجود عند الطرف الشمالى للأرض يجب أن يكون فعلا هو القطب الجنوبى للمغناطيس لانه يجذب القطب الشمالى لابرة البوصلة . وهذه بطبيعة الحال هى النتيجة الحتمية لاختيارنا طرف المغناطيس الذى يتجه للشمال ، قطبا مغناطيسيا شماليا . وعلى الرغم من أن التعريف العادى للقطب الشمالى والجنوبى قد تسبب بعض الخلط الا أن هذا لايشكل أية صعوبة بالنسبة للطالب الماهر .



شكل ١٩ ١٤
لاتنطبق الاقطاب المغناطيسية للارض مع الاقطاب التى يحددها محور دورانها . وبالاضافة الى هذا فإن القطب المغناطيسى القريب من القطب الشمالى للارض هو فعلا قطب مغناطيسى جنوبى

يكون المجال المغناطيسى للأرض موازيا - كما هو مبين فى الشكل (١٩ - ١٤) لسطح الأرض بالقرب من خط الاستواء فقط أما بالقرب من القطبين فان المجال يكون عموديا على الأرض تقريبا . والكميات المطلوبة لتحديد مجال الأرض فى بقعة معينة هى اتجاه ومقدار هذا المجال . ومن المعتاد اعطاء المقدار وكذا زاوية الميل . وزاوية الميل مبينه فى الشكل (١٩ - ١٥) على أنها الزاوية θ أما قيمة B فتبلغ 10^{-4} wb/m² أو 1G على سطح الأرض ..



شكل ١٩ - ١٥
يوصف المجال المغناطيسى عند نقطة ما على الارض عن طريق تحديد كثافة التدفق B وزاوية الميل θ

١٩ - ٨ خطوط التدفق وكثافة التدفق

يوضح الشكل ١٩ - ١٦أ المجال المغناطيسى بين قطبى مغناطيس على شكل U كالممثل فى الجزء (ب) من الشكل . ومن السهل ادراك هذا لو تذكرنا أن إبرة البوصلة تنتظم موازية لخطوط المجال وأن هذه الخطوط تنبع من القطب الشمالى . وكما ذكرنا فى حالة المجال الكهربائى فان كثافة الخطوط تعتبر مقياسا لشدة المجال ، وسنتفق - على الأقل للأغراض الحسابية - أن نرسم الخطوط بالطريقة التالية .

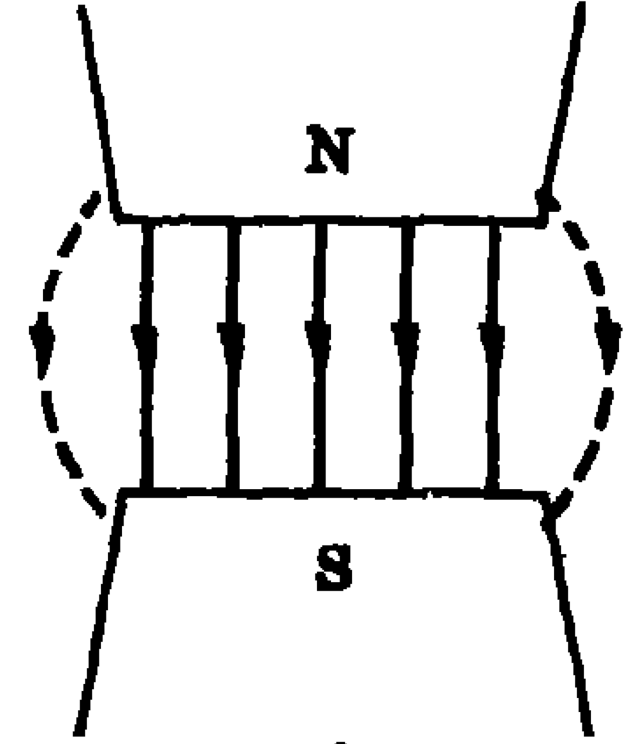
العلاقة بين خطوط المجال و B

اذا كان مقدار المجال المغناطيسى هو B فاننا سنرسم عددا من الخطوط مساويا B يمر خلال وحدة المساحات العمودية على المجال . على هذا ففى الشكل ١٩ - ١٦أ اذا كانت مساحة الأقطاب هى A لزم أن ترسم عدد BA من الخطوط التى تخرج من القطب العلوى وتدخل فى السفلى (مع اهمال تأثير

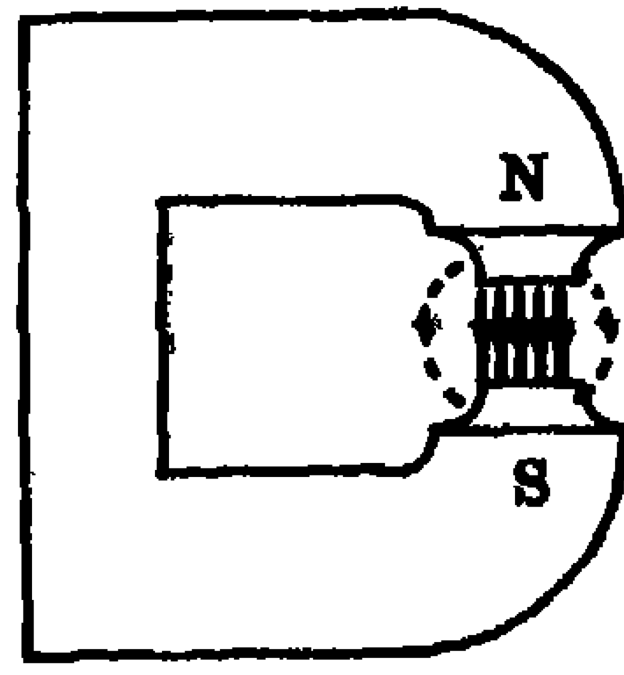
التهدب) . ويسمى المجموع الكلى للخطوط المارة خلال مساحة ما **بالتدفق** خلال هذه المساحة ويمثل بالحرف الاغريقى ϕ(فاى) . وعلى هذا يكون لدينا ،

تعريف

$$\phi = B_{\perp}A$$



(أ)



(ب)

شكل ١٩ - ١٦
يصور الشكل (أ) المجال المغناطيسى بين قطبى المغناطيس المبين فى الجزء (ب) . لم يتهدب المجال عند حافة المغناطيس ؟

حيث قد استخدم الرمز $B_{\perp}$ لتذكيرنا أنه يجب استعمال مركبة B العمودية على المساحة .

السبب فى الاصرار على وجوب التعامد يظهر بسهولة فى الشكل ١٩ - ١٧ ، ففى الجزء (أ) يكون عدد الخطوط الماره خلال المساحة هو بالضبط $\phi = BA$ ولكن فى الجزء (جـ) تمر جميع الخطوط متجنبة المساحة ولايمر أحدها من خلال المساحة ولذا $\phi = 0$ ، والمساحة هنا موازية للخطوط أما الحالة المتوسطة فمن الصعب معالجتها وهنا يجب النص فقط على أن التدفق خلال المساحة يساوى حاصل ضرب A فى مركبة B العمودية على المساحة .

وحدات B هى كما ذكرنا Webers/m^2 ولما كا التدفق عبارة عن حاصل ضرب B فى المساحة لذا فوحدات التدفق تكون webers. ولما كانت B هى التدفق لوحدة المساحات فانها تسمى دائما **كثافة التدفق** .

(أ)

(ب)

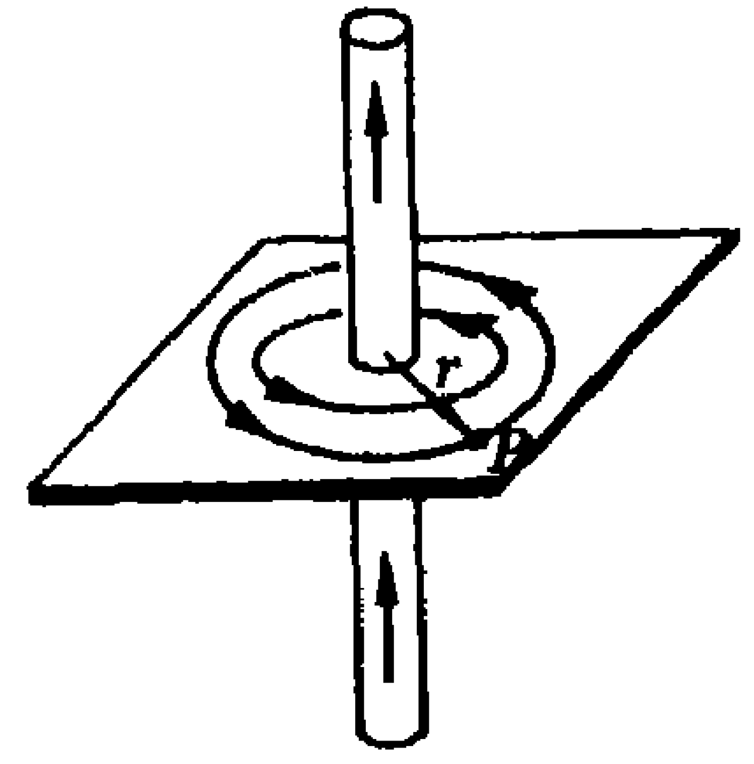
(ج)

شكل ١٩ - ١٧
يمر الحد الاقصى من التدفق خلال مساحة ما حين تكون هذه المساحة كما فى الوضع (أ) ولايمر تدفق على الاطلاق حين يكون اتجاه المساحة كما فى (ج) .

١٩ - ٩ قانون أمبير وحساب B

على الرغم من أننا قد أشرنا الى أن المجال المغناطيسى يتولد من التيار أو سريان الشحنات الا أننا لم نقم الى الآن بتقديم طريقة لحساب B بدلالة التيار. وعلى العموم يشكل حساب B خارج عروة تيار أو أى نظام معقد مشكلة رياضية صعبة ، على أنه فى بعض الحالات الخاصة يكون الحساب سهلا نسبيا كما سنرى .

لقد أمدتنا قاعدة اليد اليمنى بطريقة للحصول على الملامح الكيفية للمجال المغناطيسى خارج سلك يحمل تيارا. فنحن نعرف مثلا أن مجالا مغناطيسيا يلتف حول



شكل ١٩ - ١٨
يحيط المجال المغناطيسى بالسلك المستقيم الطويل الذى يحمل تياراً

سلك طويل مستقيم بالكيفية المبينة فى الشكل ١٩ - ١٨ . وبالإضافة الى هذا يمكن التخمين بأن B تصير أقل فى المقدار كلما بعدنا عن السلك . على أنه للحصول على القيمة الكمية لـ B فإن علينا أن نستفيد من العلاقة التى اكتشفها اندريه مارى أمبير (١٧٧٥ - ١٨٣٦) والتى يمكن تصورها على النحو التالى .

لقد كان معلوما لأمبير من خلال العديد من التجارب أن مقدار شدة المجال المغناطيسى B على بعد r من سلك طويل يحمل تيارا I ، يتغير عكسيا مع r وطرديا مع I . وبالرموز .

$$B \propto \frac{I}{r}$$

ويمكن تعيين ثابت التناسب من التجربة وهو يمثل بالكمية $\mu_0/2\pi$ بحيث أنه يصبح لدينا

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r}$$

الانفاذية المطلقة للفراغ

وذلك للحث المغناطيسى عند النقطة P فى الشكل ١٩ - ١٨ . الكمية μ_0 تسمى **الانفاذية المطلقة فى الفراغ وقيمتها المضبوطة هى** $4\pi \times 10^{-7}$ wb(A)(m) كما سيتضح فى الفصل الثانى والعشرين .

بالنظر الى الشكل ١٩ - ١٨ نلاحظ ان مقدار B يجب أن يظل ثابتا على دائرة متحدة المركز مع السلك وينتج هذا من حقيقة أنه لاتوجد نقطة أكثر تفضيلا على مثل هذه الدائرة ، وذلك لأن السلك نفسه دائرى وموجود عند مركز الدائرة ولهذا فكل نقطة على الدائرة لايمكن تمييزها عن جميع النقط الأخرى على نفس الدائرة . ولهذا فإن B يجب أن تكون هى نفسها عند جميع نقط الدائرة . اذا ضربت B الكائنة عند نصف القطر r فى طول المسار الدائرى الذى له نفس القطر (أى $2\pi r$ فإننا - بعد استعمال العلاقة التجريبية للمقدار B - نحصل على ،

$$(B)(2\pi r) = \mu_0 I$$

ولنحاول النص على هذه النتيجة بطريقة أخرى . نختار مسارا مقفلا (وبالتحديد دائرة) يحيط بتيار I ،يعطينا حاصل ضرب طول هذا المسار فى مقدار B الكمية $\mu_0 I$ كنتيجة . وهنا اغراء للتساؤل عن امكانية تعميم هذه النتيجة لمسار على هيئة مستطيل بدلا من دائرة . أو ربما حصلنا على اجابة بسيطة حتى فى حالة استخدام مسار معقد على هيئة مضلع متعدد الجوانب يحيط بالسلك،ولقد استطاع أمبير أن يوضح أن

الأمور هى فعلا هكذا أى أن تعقد المسار الذى يحيط بالسلك الحامل للتيار I لاتؤثر فى الحصول على نتائج بسيطة . وكل ما تحتاجه هو تفتيت المسار الى موجهات قصيرة بحيث يكون متجه المجال المغناطيسى **B** ثابتا فى كل منها . وبعد ذلك لو أن حاصل ضرب كل طول فى مركبة **B** الموازية لهذا الطول أخذ فإن مجموع كل هذه الحواصل يكون مساويا $\mu_0 I$.

وقد احتوى اكتشاف أمبير فيما يعرف الآن باسم **قانون أمبير للدوائر** . وقبل أن نكتب القانون على صورة رياضية فلنحاول تطبيقه على مسار معقد كالمبين فى الشكل ١٩ — ١٩ . لقد تم تفتيت المسار الى عدد كبير من الأطوال القصيرة $l_1, l_2, \ldots, l_{100}$ حيث تعتبر عدد هذه الأطوال مائة بغرض المناقشة . وقد يكون علينا فعلا أن نستخدم عددا أكبر وأطوالا أقصر حتى لا تتغير قيمة **B** بشكل محسوس داخل كل طول . علينا الآن أن نأخذ الطول الأول l_1. ونضربه فى مركبة **B** الموازية له فى الموقع الخاص به ونرمز لهذا بالرمز $(lB_\parallel)_1$، ثم نقوم بالمثل فى حالة القطعة الثانية ، الحاصل هو $(lB_\parallel)_2$ وهكذا . والآن ينص قانون أمبير للدوائر على أن

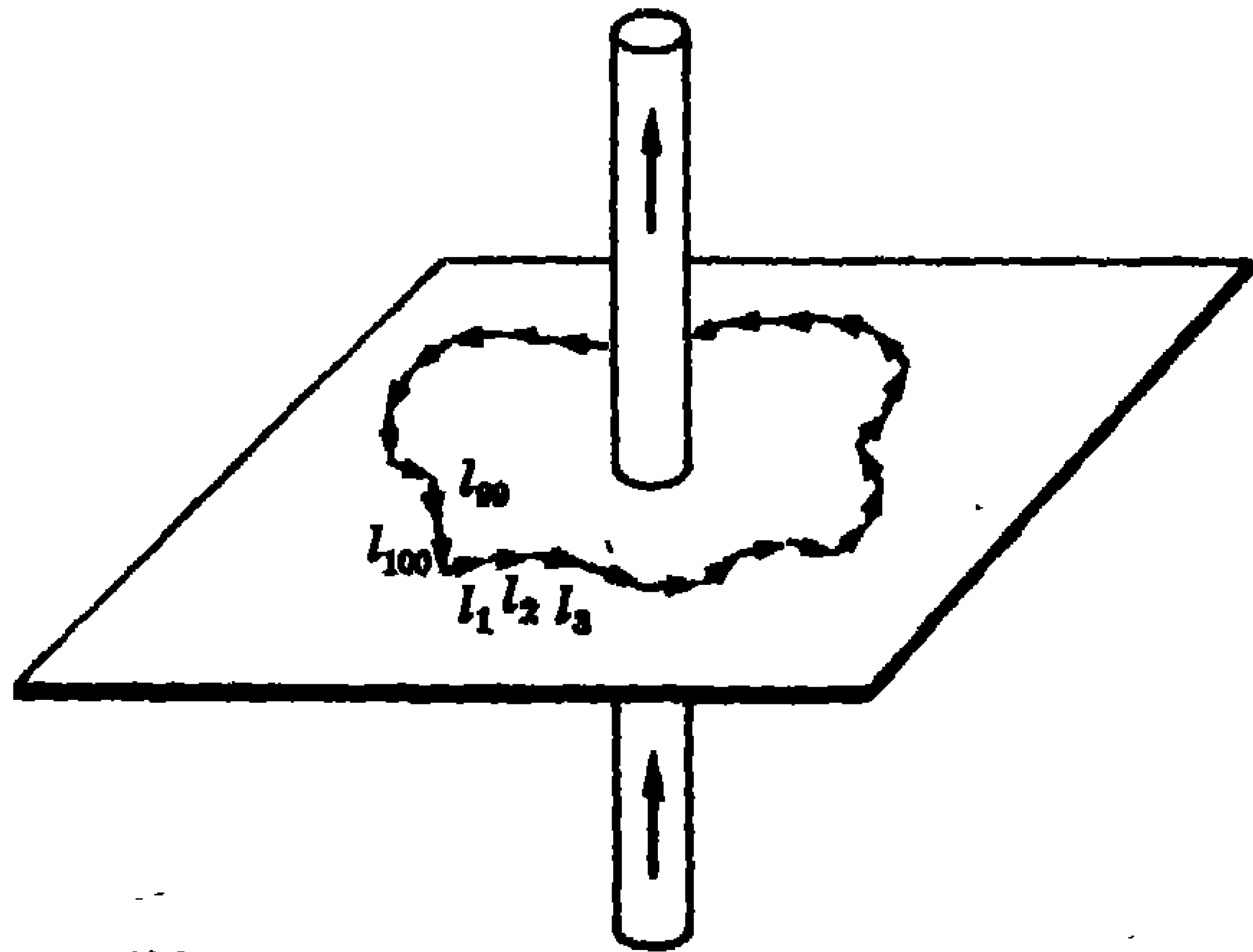
$$(lB_\parallel)_1 + (lB_\parallel)_2 + (lB_\parallel)_3 + (lB_\parallel)_4 + \cdots + (lB_\parallel)_{100} = \mu_0 I$$

حيث + ... + تمثل حدودا أخرى فى المجموع .

ويمكننا كتابة المعادلة على صورة رمزية بالطريقة التالية

$$\Sigma(lB_\parallel)_n = \mu_0 I \qquad (١٩ - ٥) \quad \text{قانون امبير للدوائر}$$

حيث يعنى الرمز $\Sigma(lB_\parallel)_n$ أن نأخذ الحواصل المختلفة للكمية $lB_\parallel$ حول المسار المقفل . وتعتبر المعادلة (١٩ — ٥) هى المنطوق الرياضى لقانون أمبير للدوائر ويجب تذكر أن عناصر الطول l يجب أخذها أصغر ما يمكن حتى تكون B ثابتة بشكل معقول على كل عنصر من عناصر الطول .



شكل ١٩ — ١٩
يستخدم المسار المقفل أو والعروة المتكونة من الموجهات المبينة عند دراسة قانون أمبير

سنحسب الآن كثافة التدفق B خارج سلك طويل مستقيم وذلك كمثال على استخدام هذا القانون . إفترض اننا نريد إيجاد B عند النقطة P فى الشكل (١٩ - ٢٠) . تفيدنا قاعدة اليد اليمنى أن B سوف تلتف حول السلك فى اتجاه الأسهم ، كما أن مقدار B سيكون ثابتا فى كل نقطة على الدائرة حيث أن هذه النقط متماثلة بالنسبة للسلك . ولاستخدام قانون أمبير سنبدأ باعتبار أن الدائرة فى الشكل ١٩ - ٢٠ مكونة من عدد كبير ، وليكن ألف مقطع صغير أو متجه تمتد حول الدائرة . بكتابة المعادلة ١٩ - ٥ نجد أن

$$(lB_\parallel)_1 + (lB_\parallel)_2 + (lB_\parallel)_3 + \cdots + (lB_\parallel)_{1000} = \mu_0 I$$

حيث تعنى + ... + مرة أخرى كل الحدود الداخلة فى عملية الجمع ولم تكتب . ولكننا رأينا أن B تلتف حول السلك بنفس الطريقة التى تفعلها هذه المتجهات الصغيرة . وبالاضافة الى هذا فإن B ثابتة عند كل موقع بالعروة . ومن ثم فكل قيم $B_\parallel$ متساوية فيما بينها وتساوى القيمة الكلية لـ B عند النقطة P حيث أن B تلتف فى مستوى مواز للعروة.ونتيجة لها تصبح المعادلة السابقة بعد استخلاص قيمة $B_\parallel$ أو B

$$B(l_1 + l_2 + l_3 + \cdots + l_{1000}) = \mu_0 I$$

ولكن مجموع الأطوال l_1 والخ هو بالضبط طول المسافة حول الدائرة ، $2\pi a$. ومن ثم نجد .

$$(B)(2\pi a) = \mu_0 I$$

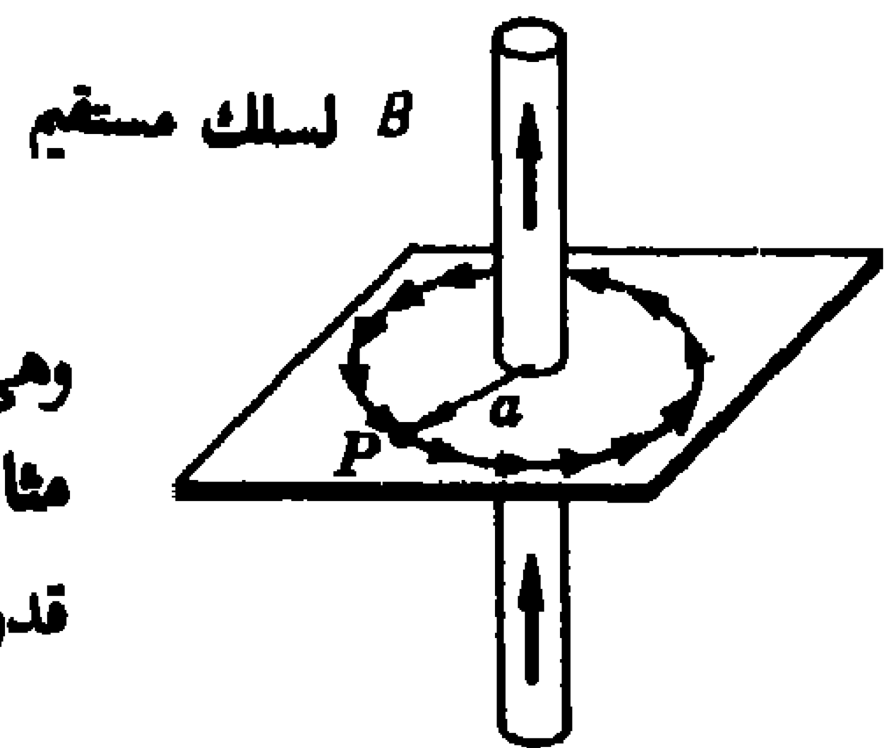
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

وهى النتيجه الموجودة بالتجربة كما ذكر من قبل .

مثال توضيحى ١٩ - ٣ اوجد قيمة B عند نقطة تبعد 5cm من سلك يحمل تيارا قدره 20A

طريقة الحل : باستخدام المعادلة (١٩ - ٦) نجد أن

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(20)}{(2\pi)(0.05)} = 0.80 \times 10^{-4}\ \text{T} = 0.80\ \text{G}$$



شكل ١٩ - ٢٠
تكون المتجهات عروة مقفلة متحدة المركز مع السلك وتعتبر ثابته على هذا المسار

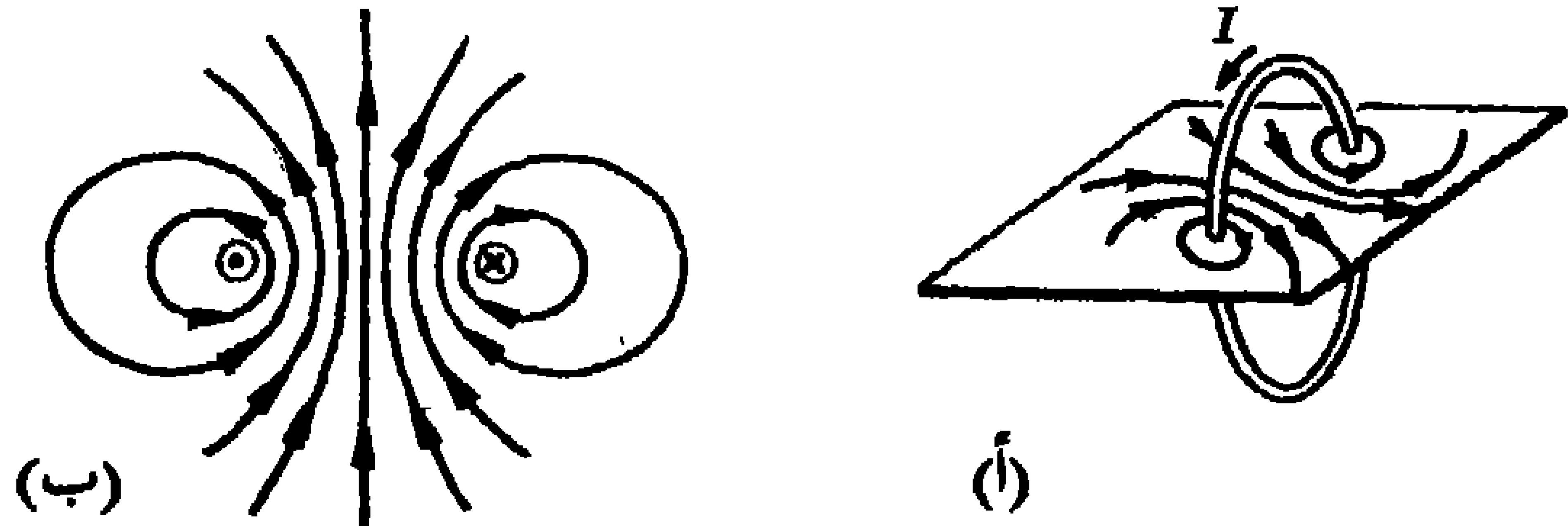
عليك وضع الوحدات فى المعادلة السابقة والتحقق من الوحدات التى فى الاجابة . يبلغ المجال عند هذه المسافة من السلك ما يقارب مجال الأرض من حيث الشدة . اذا اعتبرنا هذا فهل يمكنك التفكير فى أية مشكلة عملية كان يمكن أن يقابلها اورستد فى الحصول على شكل المجال حول سلك ؟

١٩ - ١٠ المجال المغناطيسى لعروة دائرية

افترض أن سلكا طويلا يحمل تيارا قدره I قد حنى على شكل دائرة كالتى فى الشكل ١٩ - ٢١ أ . يجب أن يلتف المجال القريب من السلك حوله كما فعل فى حالة السلك المستقيم ولكن شكل المجال سيكون مشوها بدرجة بالغة عند مسافة ما من السلك كما هو مبين بطريقة اكثر وضوحا فى الشكل ١٩ - ٢١ ب حيث يرى مقطع مستعرض للعروة . يشير الرمز (.) الى أن السلك يحمل تيارا فى اتجاه خارج من الصفحة ، بينما الرمز (X) الى تيار يدخل فى الصفحة . (تذكر أن هذه الرموز قد جاءت من الطرف المدبب للسنهم وذيله ذى الريش) .

يبدو أن جساب B فى هذه الحالة سيكون معقدا لأقصى حد فيما عدا عند نقطة على محور العروة . ولا يمكننا استعمال قانون أمبير بسهولة لانه لايوجد مسار واضح فى شكل ١٩ - ٢١ تكون فيه قيمة B ثابتة أو معلومة . وعلينا أن نستخدم طرقا أخرى فى هذه الحالة ، وهذه الطرق تنطوى على حساب التفاضل والتكامل ، ولذا فاننا سنعالج هذا المثال بطريقة كيفية فقط .

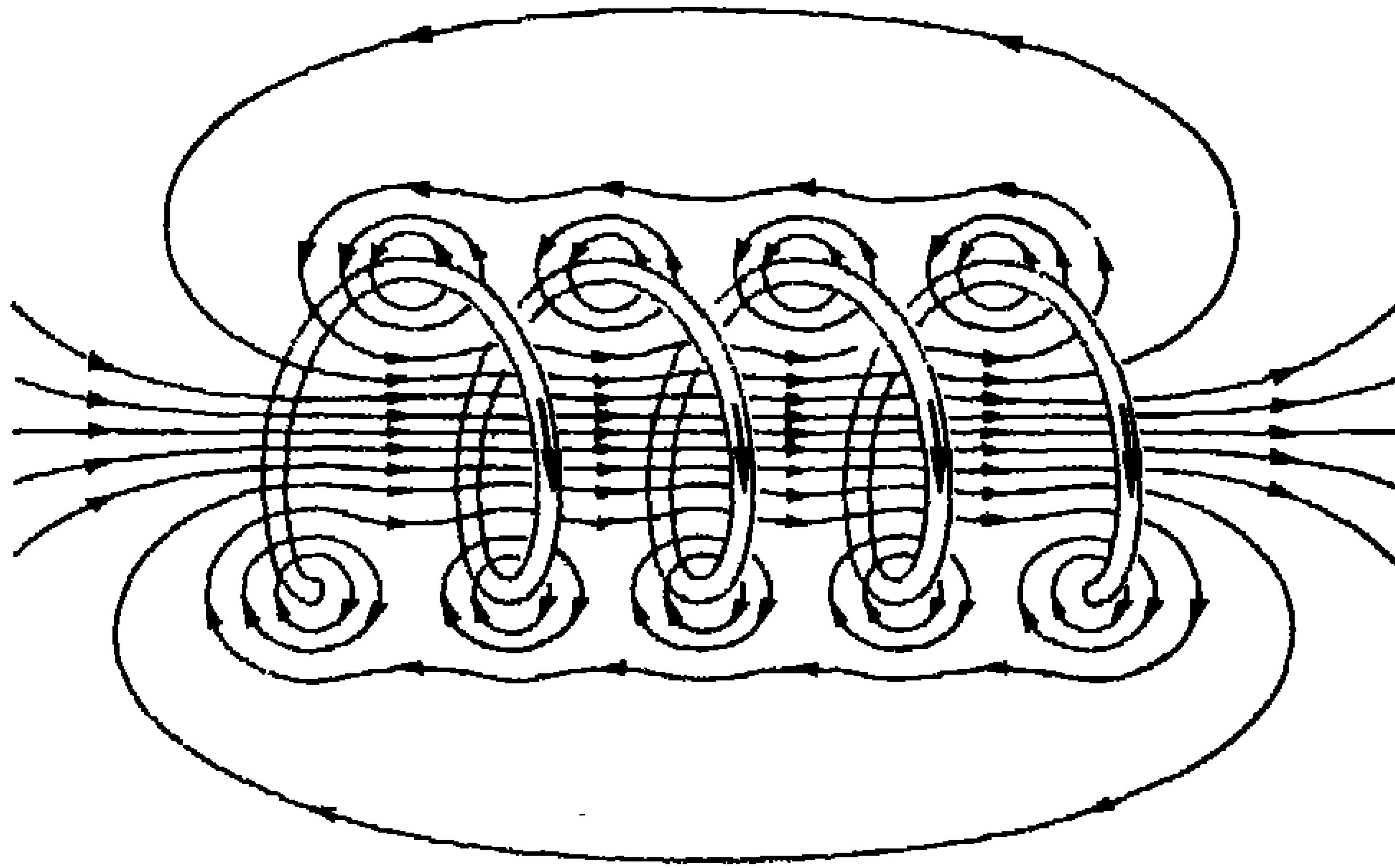
لو أن لدينا عددا من العرى لسلك وملفوفة باحكام معا ، فان صورة المجال ستبدو كما فى الشكل ١٩ - ٢١ تماما . لكن العروة المبينة يمكن أن تفسر على أنها مكونة من عدة لفات أو عرى من السلك . لو أن التيار المار فى السلك كان I لكل من العروة المنفردة والملف الذى يحوى N عروة لكان المجال المغناطيسى B لهذا الملف أكبر N مرة من ذلك الذى للعروة المنفردة .



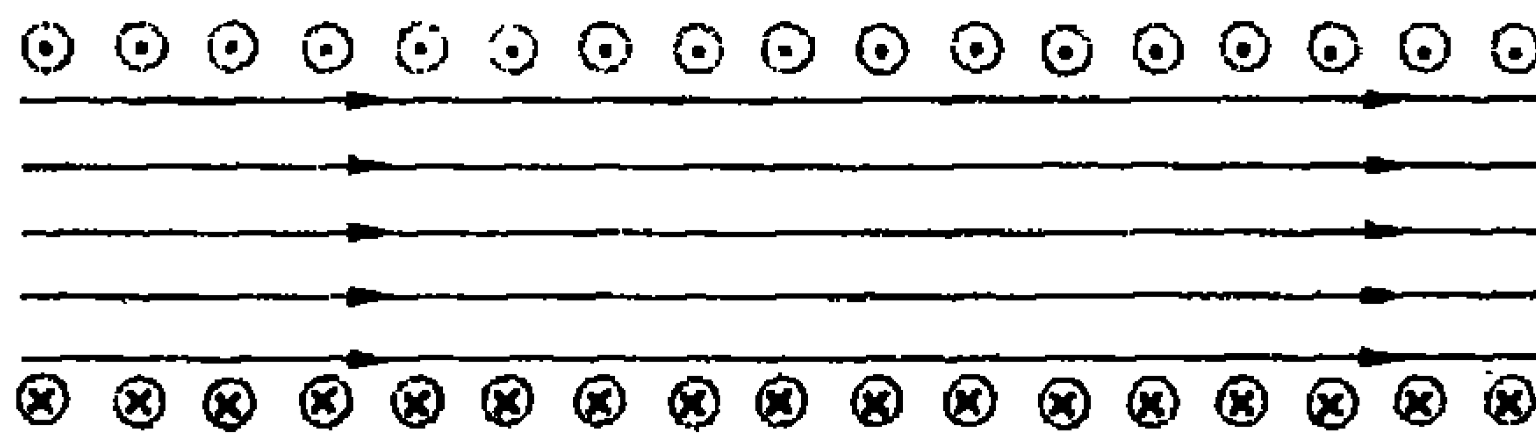
شكل ١٩ - ٢١
منظران للمجال المغناطيسى حوله عروة تحمل تيارا

١٩ – ١١ الملف اللولبى

الملف اللولبى هو ملف اسطوانى طويل من السلك . ولتوضيح المجال المغناطيسى داخله فان الشكل (١٩ – ٢٢أ) يبين ملفا لولبيا سائبا بشكل أكبر من المعتاد ، أما المقطع المستعرض لملف لولبى شائع وملفوف بإحكام فيصوره الشكل ١٩ – ٢٢ب. ويلاحظ كيف ان المجال داخل الملف اللولبى يتجه مستقيما خلاله وفضلا عن ذلك يكون المجال داخل الملف اللولبى الطويل الملفوف بإحكام أشد بكثير بداخله عن خارجه . لكثير من الأغراض العملية يمكن اعتبار المجال داخل الملف اللولبى الطويل على أنه مواز لمحوره ، أما خطوط التدفق خارج الملف اللولبى فتنتشر على هيئة مروحية فى الفضاء بحيث تكون متباعدة جدا عن بعضها البعض ، مشيرة بذلك الى أن المجال ضعيف للغاية خارج الملف اللولبى .



(أ)



(ب)

شكل ١٩ – ٢٢
يكون المجال منتظما بالضرورة داخل ملف لولبى

سيكون من الممكن حساب قيمة B داخل ملف لولبى طويل وذلك باستخدام قانون أمبير . اعتبر المسار ، أو العروة ، $abcda$ فى الشكل ١٩ – ٢٣ . فى هذه الحالة يصبح قانون أمبير كما يلى

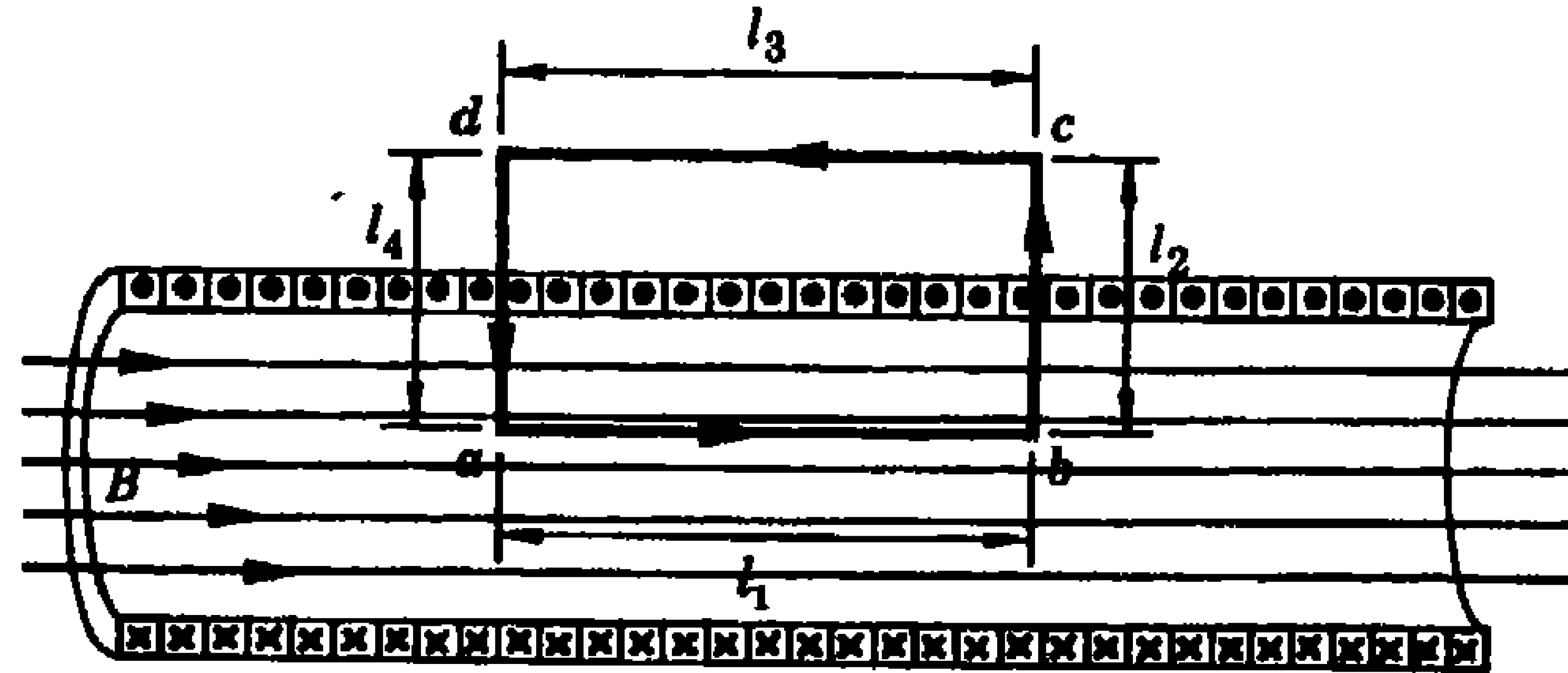
$$(\mu_0) \text{ (التيار المحاط) } = (lB_{\parallel})_1 + (lB_{\parallel})_2 + (lB_{\parallel})_3 + (lB_{\parallel})_4$$

تكون B فى داخل الملف اللولبى موازية للطول l_1 ولذا ،

$$(lB_{\parallel})_1 = l_1 B$$

وقد رأينا بالفعل أن B خارج الملف اللولبى صغيرة جدا خاصة اذا كان الملف طويلا جدا ولذا يمكننا وضعها صفرا بالتقريب . وعليه فان ،

$$(lB_{\parallel})_3 = 0$$



شكل ١٩ – ٢٣
يمكن ايجاد قيمة B داخل الملف اللولبى وذلك بتطبيق قانون أمبير للدائرة على المسار *abcda*

وفضلا عن ذلك تكون B عمودية على كل من l_4 ،l_2 داخل الملف اللولبى وتكون صفرا خارجة ، لهذا

$$(lB_{\parallel})_2 = (lB_{\parallel})_4 = 0$$

ويختصر فى هذه الحالة قانون أمبير ليصبح :

$$l_1 B = (\mu_0) (\text{التيار المحاط})$$

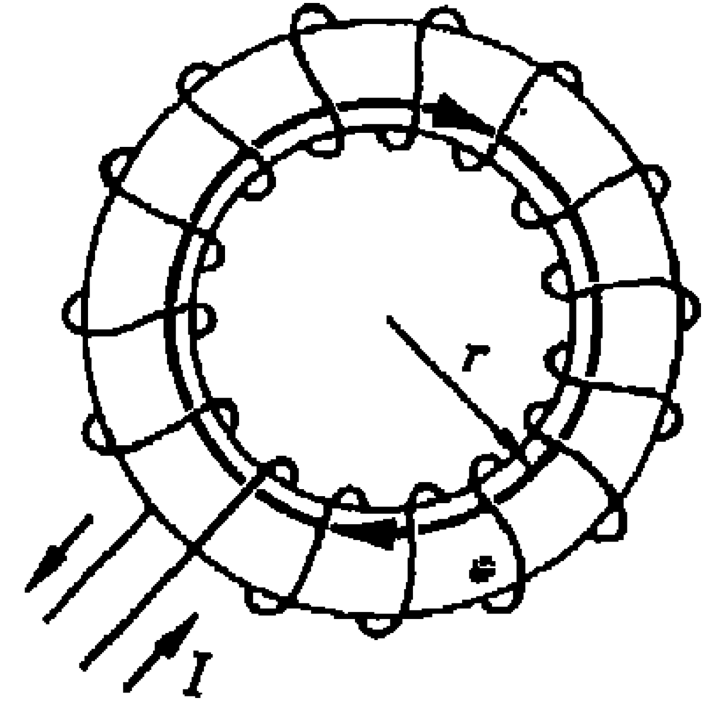
اذا كان هناك n عروة من السلك فى وحدة الاطوال من الملف اللولبى فاننا نكون قد أحطنا nl_1 عروة بهذا المسار . (وهذا الرقم هو فعلا 13 فى الشكل ١٩ – ٢٣) تحمل كل عروة تيارا قدره I يتجه خارجا من المساحة الموصوفة بهذا المسار . ويكون التيار المحاط هو nl_1I تماما . ومن ثم ،

$$l_1 B = \mu_0 n l_1 I$$

داخل ملف لولبى طويل $\qquad B = \mu_0 n I \qquad$ (١٩ – ٧) $\quad B$ فى ملف لولبى

لاحظ ان B لاتعتمد على الموضع داخل الملف اللولبى وعلى هذا فالمجال داخل الملف اللولبى ليس موازيا لمحوره فحسب بل إنه منتظم ايضا . وهذا حقيقى بالطبع لتلك النقط البعيدة عن الأطراف فقط .

١٩ - ١٢ الملف الحلقى



شكل ١٩ - ٢٤
يلف المجال المغناطيسى داخل الملف الحلقى كما هو مبين ويتجه مع حركة عقارب الساعة داخل الملف الحلقى

سنعتبر الآن الملف الحقيقى كمثال نهائى . وهذا الملف ليس الا ملفا لولبيا حنى على شكل دائرة بحيث لم تعد له أطراف . والشكل ١٩ - ٢٤ يبين رسما تخطيطيا للملف الحلقى . ومن الطبيعى أن يحتوى الملف الحلقى على عدد أكبر بكثير من لفات السلك عما هو مبين بالشكل . والمجال المغناطيسى محصور بالكامل تقريبا داخل الملف ويحيط بالملف الحلقى كما هو مبين . لحساب B فى هذه الحالة سنعتبر الدائرةالسوداءعلى أنها هى العروة المقفلة . ومن تماثل الشكل نرى أن B ستكون ثابتة فى جميع نقط الدائرة كما أنها تكون مماسية للدائرة . عند استبدال مجموعة من المتجهات بالدائرة وتذكر أن B ثابته فإن قانون أمبير يؤدى الى :

$$(lB_\parallel)_1 + (lB_\parallel)_2 + \cdots + (lB_\parallel)_n = (\mu_0) \text{ (التيار المحاط)}$$

وحيث أن B ثابتة ،

$$B(l_1 + l_2 + \cdots + l_n) = (\mu_0) \text{ (التيار المحاط)}$$

أو

$$(B)(2\pi r) = (\mu_0) \text{ (التيار المحاط)}$$

كما نرى ، يساوى التيار المحاط المقدار NI ، حيث N هى العدد الكلى للفات السلك الموجود على الملف الحلقى . ومن ثم ،

$$2\pi rB = \mu_0 NI$$

أو

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad \text{ملف حلقى}$$

B فى ملف حلقى

لاحظ أن B فى حالة الملف الحلقى ليست منتظمة بداخل الملف وذلك لأنها تتغير بتغير قيمة r . على أنه إذا كان قطر كل عروة يعتبر صغيرا إذا قورن بقطر الحلقة فان r لن تتغير كثيرا من مكان لآخر داخل الملف الحلقى ويمكن على هذا اعتبار B ثابتة تقريبا .

مثال توضيحى ١٩ - ٤ يحتوى ملف لولبى طويل على 50 لفة من السلك لكل سنتيمتر من طوله،وكان التيار المار فى السلك 0.50 A.فاذا كان قطر الملف اللولبى 2.0 cm فاوجد قيمة B فى الملف وكذا التدفق خلال الملف اللولبى .

طريقة الحل : لايجاد B نستخدم المعادلة (١٩ - ٧) .

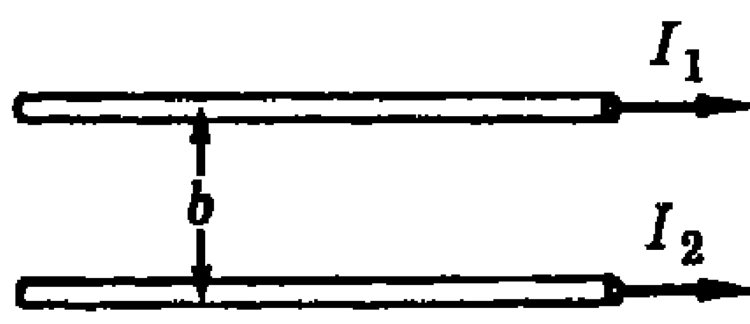
$$B = \mu_0 nI = (4\pi \times 10^{-7})(50 \times 100)(0.50)$$
$$= 31.4 \times 10^{-4}\ \mathrm{T} = 31.4\ \mathrm{G}$$

حيث أن عليك أن تكتب الوحدات المستخدمة فى المعادلة . التدفق ϕ هو عدد الخطوط التى تمر خلال الملف اللولبى . هناك عدد B خط لوحدة المساحات تمر فى الملف ولهذا فان $\phi = BA$ ، حيث A هى مساحة المقطع للملف اللولبى . ومن ثم ،

$$\phi = (31.4 \times 10^{-4}\ \mathrm{Wb/m^2})(\pi \times 10^{-4}\ \mathrm{m^2}) \approx 10^{-6}\ \mathrm{Wb}$$

حيث استخدمت العلاقة $1\mathrm{T} = 1\mathrm{Wb/m^2}$

مثال توضيحى ١٩ — ٥ اعتبر السلكين الطويلين المستقيمين المتوازيين فى الشكل (١٩ — ٢٥) اوجد القوة المؤثرة على وحدة الأطوال للسلك الأسفل والناتجة من التيار المار فى السلك الأعلى .



شكل ١٩ — ٢٥
يؤثر المجال المغناطيسى الناتج من السلك الأعلى على I_2 ليدفع السلك الأسفل نحو السلك الأعلى

طريقة الحل : يسبب التيار I_1 مجالا مغناطيسيا يتجه الى داخل الصفحة عند موقع I_2 ومقدار هذا المجال ،

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b}$$

ولكن حيث أن القوة المؤثرة على سلك هى $B_\perp IL$ ، وحيث أن $I = I_2$ فى هذه الحالة ، فان لدينا ،

$$F = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b} I_2 L$$

ومنها

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b}$$

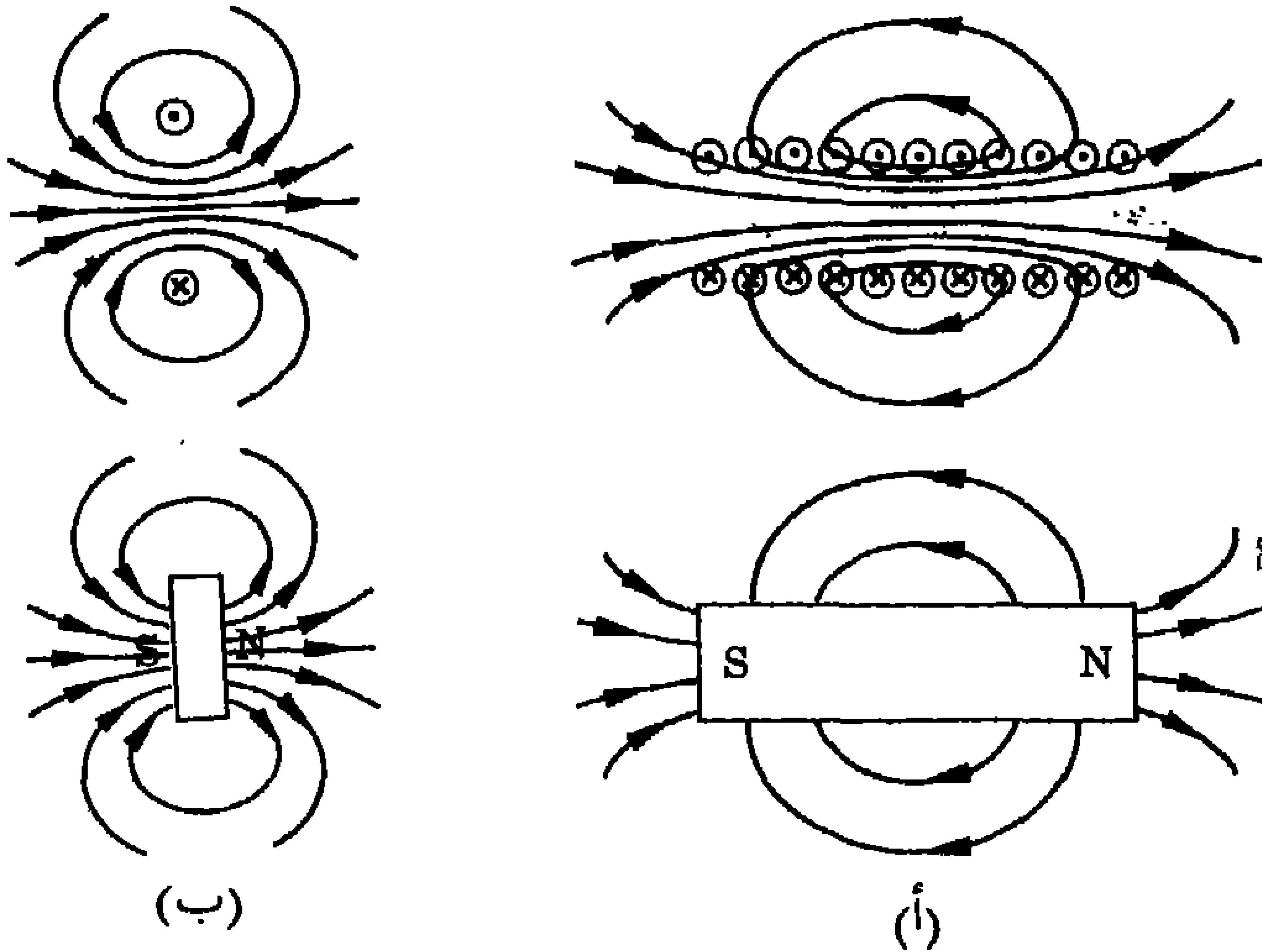
هل يمكنك اثبات أن اتجاه القوة يكون بحيث تدفع السلك الاسفل نحو السلك الأعلى ؟ لاحظ أنه عندما يحمل السلكان نفس التيار $I_1 = I_2 = I$ فان هذا التيار يصبح مساويا $(2\pi bF/L\mu_0)^{1/2}$ وهذا يتيح طريقة لقياس التيارات بدلالة قياسات القوة والطول

١٩ — ١٣ نظرية أمبير للمغناطيسات

لايملك الانسان الا أن يلحظ التشابه بين المجال المغناطيسى لقضيب وذلك الذى لملف لولبى كما هو مبين فى الشكل (١٩ — ٢٦أ) ، وقد لاحظ أمبير هذا أيضا .

وفى الحقيقة فقد لاحظ أنه حتى المجال الناشىء عن عروة واحدة كان يشبه تماما المجال الذى يتوقعه الانسان من مغناطيس قصير كما هو مبين فى الشكل (١٩ – ٢٦ ب) . وقد وضع نظرية على أن كل التأثيرات المغناطيسية ، حتى فى القضبان المغناطيسية ، هى نتيجة للتيارات السارية . ونعتقد أن هذه الافكار صحيحة من أساسها على الرغم من أننا لازلنا لم نفهم تماما لماذا تتصرف بعض الجسيمات الأساسية كالالكترون مثلا كما لو كانت مغناطيسات صغيرة .

لو أننا قبلنا نظرية أمبير فإننا نرى على الفور أنه من المستحيل تماما الحصول على قطب شمالى قائم بذاته ، فالقطب الشمالى ليس إلا جانبا واحدا من عروة تيار (أو مجموعة من عرى التيار) وسيظل الجانب الآخر موجودا دائما كقطب جنوبى (انظر الشكل ١٩ – ٢٦) ولهذا السبب يتحدث الفيزيائيون اليوم عن خرافة القطب ، ويعنى هذا إنه لايوجد جسيم يمكن اعتباره قطبا مغناطيسيا . وعلى العكس من الشحنات الموجبة والسالبة الطليقة فان القطب الشمالى والجنوبى لايمكن فصلها عن بعضهما البعض أبدا بشكل تام* .



شكل ١٩ – ٢٦
المجال المغناطيسى حول ملف لولبى شبيه جدا بمجال قضيب مغناطيسى له نفس الحجم تقريبا

المواد ذات المغناطيسية الحديدية

فى الواقع لم يكن لدى أمبير بالطبع أية فكرة عن تركيب الذرات والجزيئات حتى مع اعتقاده بأن المادة مكونة من ذرات-ولذا لم يستطع ان يدرك كيف يمكن أن تتواجد عرى التيار فى قطعة من الحديد الممغنط . ونعلم اليوم أن كل ذرة تتصرف كمغناطيس صغير بل ان بعض الذرات كالحديد ، الكوبالت والنيكل (وكذا الجاد ولينيوم

*هناك مجموعة حديثة من التجارب التى ابتكرت لتبين أن القطب المنفرد يمكن أن يوجد على « جسيم وحيد القطب » . ولسوء حظ أولئك الذين يحبون الاثارة فان التفسير الذى عولجت به تلك التجارب كان خاطئا ولازال البحث عن الجسيم وحيد القطب مستمرا .

والديسبروزيوم) تتعاون مع بعضها البعض بحيث تتصرف تماما مثل مغناطيسات صغيرة قوية . وهذه الذرات تسمى ذرات **ذات مغناطيسية حديدية** . وتتصرف الذرات الأخرى مثل مغناطيسات أضعف

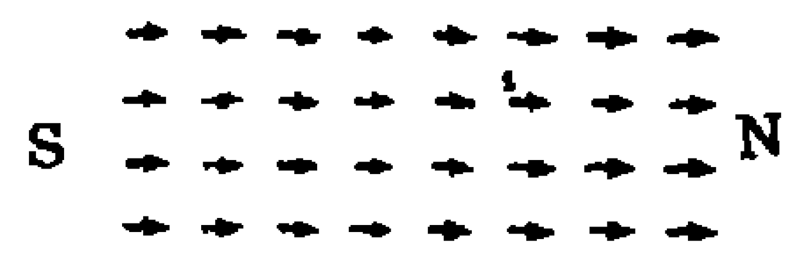
من المناسب دائما أن نفكر فى الطبيعة المغناطيسية للذرات على أنها الى حد ما نتيجة لسريان الالكترون داخل الذرات بحيث تبدو كعرى للتيار . وفضلا عن ذلك فإن الالكترون نفسه يتصرف مثل قضيب مغناطيسى صغير . يمكن للإنسان أن يفكر فى الالكترون على أنه شحنة تقوم بحركة تدويم حول محوره مكونا بهذا عروة تيار ويسمى هذا التأثير **تدويم الالكترون**.ويجب أن نشير الى أن معظم الفيزيائيين يتجهمون لهذه الصورة التفصيلية عن الذرة لأن هناك سببا للاعتقاد بأن هذه الصورة لايمكن اثباتها عمليا ، وفضلا عن ذلك فإن هذه الطريقة فى تصوير التدويم ليست فرضية تماما من بعض النواحى ولازلنا غير قادرين على التوفيق بينها وبين النتائج الكمية للتجارب .

نعلم انه لو وضعنا مجموعة من المغناطيسات الدقيقة بالقرب من بعضها البعض فانها تحاول ترتيب أنفسها بحيث يكون القطب الجنوبى لاحدها أقرب مايكون للقطب الشمالى للآخر وهذا ناتج عن أن الاقطاب المختلفة تتجاذب وأن المتشابهة تتنافر . ويتم الوصول الى الحد الادنى من طاقة الوضع للنظام عندما تتراص المغناطيسات بشكل ما كما فى شكل (١٩ - ٢٧أ) . لاحظ ان المغناطيسات المتراصة بهذه الطريقة تكافىء مغناطيسا كبيرا .

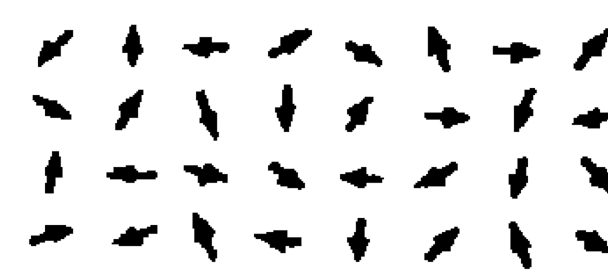
على ان المغناطيسات اذا هيجت بشدة عن طريق هز الورق أو اللوح الذى تستقر فوقه المغناطيسات فانها تنطلق من اسار بعضها البعض وينتهى بها الأمر كما هو مبين فى الشكل (١٩ - ٢٧ ب) . لاحظ ان المغناطيسات المنفردة تميل الى الغاء بعضها البعض ولاتعود تؤثر كقضيب مغناطيسى قوى .

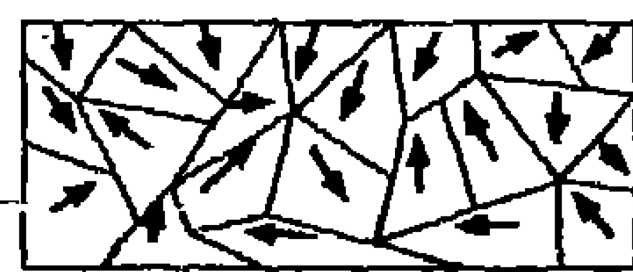
درجة حرارى كورى

هناك موقف مشابه لهذا يحدث للذرات داخل الجسم الصلب ، فالاهتزازات الحرارية تميل الى تهييج النظام وتمنع الذرات من ترتيب أنفسها كما فى الشكل (١٩ - ٢٧أ) . ولايستطيع الاحتفاظ بالتشكيل المبين فى الجزء (أ) إلا مغناطيسات ذرية معينة كالحديد والمواد ذات المغناطيسية الحديدية الأخرى وذلك عند درجات الحرارة العادية . وحتى هذه الذرات ، اذا سخنت بدرجة كافية فانها تكتسب مايكفى من الطاقة الحرارية لكى تنطلق وتفقد ترتيبها كما فى الجزء (ب) . وتعتبر درجة الحرارة التى يحدث



(أ)


(ب)

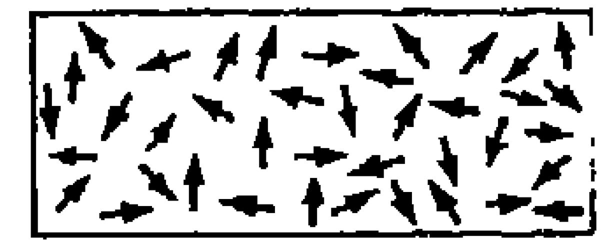

(جـ)

شكل ١٩ - ٢٧
(أ) قطعة ممغنطة من الحديد ، (ب) الحديد غير الممغنط ، عديم الترتيب مبين تخطيطيا ، (ج) صورة أكثر واقعية للمناطق

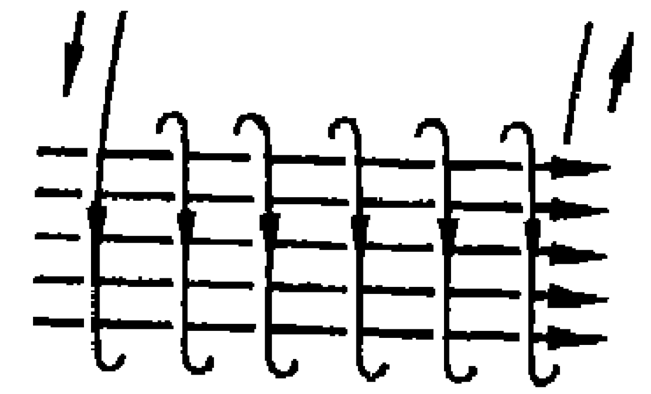
عندها هذا الأمر محددة تماما لأى طراز من الذرات وتسمى **درجة حرارة كورى** . على اننا يجب أن نسجل أن التشابه هنا ليس كاملا . فهناك بالاضافة الى قوى المغناطيسية بين الذرات ذات المغناطيسية الحديدية ، قوى أخرى ذات طبيعة أكثر تعقيدا . وهذه القوى يمكن فهمها فى اطار ميكانيكا الكم فقط ولذا فلن نستطيع أن نناقشها أكثر من ذلك فى هذا المقام . وهى تلعب الدور الرئيسى فى تراص المغناطيسات الذرية .

المغناطيسية الحديديه والمناطق

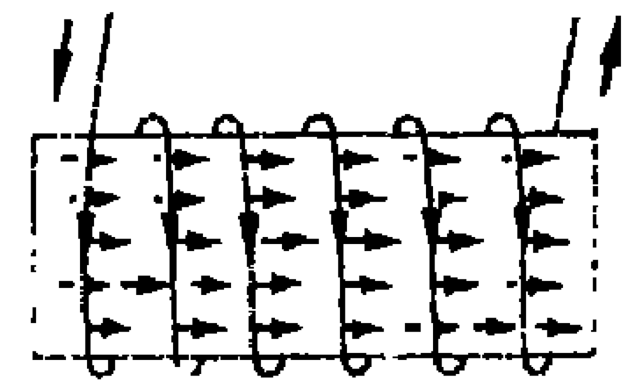
معظم المواد تكون مغناطيساتها الذرية – إن وجدت – متجهة عشوائيا كما فى الشكل ١٩ – ٢٧ ب . على أن المواد ذات المغناطيسية الحديدية تتكون من قطع صغيرة تكون بداخلها الذرات متراصة بكاملها كما فى الشكل ١٩ – ٢٧ ب ، وكل من هذه القطع المرتبة تسمى منطقة . إذا تناولنا اية قطعة عادية من انبوبة حديدية ، فان كل منطقة قد تحتوى على مايقرب من 10^{16} ذرة . وهذه المنطقة لاتشغل سوى كسر صغير من المليمتر بالنسبة لأبعادها الخطية . على أن المناطق فى قطعة غير ممغنطة من الحديد تكون فيما بينها متجها عشوائيا ويصبح الموقف أقرب مايكون الى الشكل (١٩ – ٢٧ ب) حيث تمثل الأسهم مناطق مختلفة بدلا من ذرات . اما الشكل (ج) فيعطى صورة أكثر واقعية للمناطق . فإذا أردنا أن نمغنط قضيبا من الحديد فإن المناطق داخله يجب أن تصطف داخل المادة ويمكن الوصول الى هذا بالطريقة التالية .



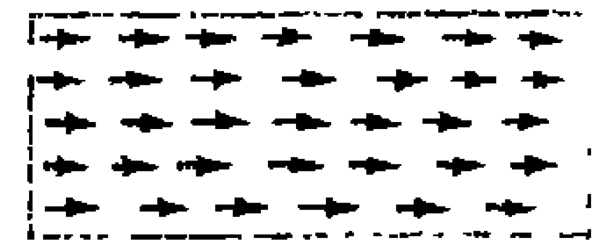
(أ)



(ب)



(ج)



(د)

شكل ١٩ – ٢٨
يمكن مغنطة قطعة من الحديد غير الممغنط باستعمال المجال داخل ملف لولبى ليقوم بترتيب المناطق

افترض اننا بدأنا بقضيب غير ممغنط من الحديد كما فى الشكل (١٩ – ٢٨أ) . هناك ملف لولبى يحمل تيارا كما هو موضح فى الجزء (ب) من الشكل ولهذا الملف مجال مغناطيسى ضعيف بداخله كما أوضحنا فى المثال التوضيحى ١٩ – ٤ . لو أننا الآن أدخلنا الحديد فى الملف اللولبى فإن المجال المغناطيسى B للملف اللولبى سوف يؤثر بقوة إلى اليمين على الأقطاب الشمالية للمناطق أما الأقطاب الجنوبية فتجبر على الإتجاه الى اليسار . إذا كانت قوى الاحتكاك بين المناطق ليست كبيرة بدرجة كافية فان المناطق ستوجه تحت تأثير المجال كما هو مبين فى الجزء (جـ) من الشكل ١٩ – ٢٨ *.

وتصبح قطعة الحديد قضيبا مغناطيسيا له قطب شمالي وآخر جنوبي . ومن السهل توجيه المناطق فى حالة الحديد « الرخو » أما فى حالة الحديد الصلد فيجب أن يكون المجال كبيرا بدرجة كافية أو تهيج المناطق بالتسخين أو الطرق الميكانيكية حتى يمكنها الدوران واتخاذ اتجاه المجال . (ترجع التسمية بالرخو او الصلد فقط الى الخواص

* فى الواقع تدور المناطق معا ككل بشكل نادر نسبيا ويكون أكثر الترتيب حدوثا عن طريق نمو المناطق الموجهة توجيها صحيحا على حساب المناطق الأخرى ذات التوجيه الخطأ . وأثناء هذه العملية لوحظ أن جدران المناطق تتحرك . الطاقة اللازمة لهذه العملية وكذا التأثيرات الناتجة هى بالضرورة نفسها بالنسبة للعملية الأولى (نمو المناطق) .

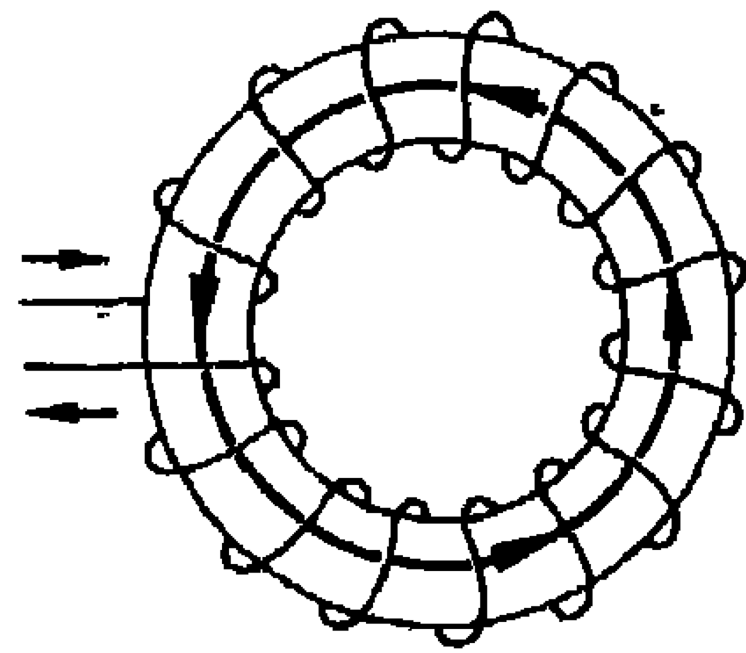
المغناطيسية وليس الى الصلادة الفيزيائية) . من الممكن ترتيب المناطق بطريقة كاملة تقريبا وتكوين قضيب مغناطيسى كبير كما فى الجزء (جـ) .

حالما تترتب المناطق ، فإن كثافة الفيض الكلية B تتركب من جزءين . لازال مجال الملف اللولبى الضعيف موجودا ، على أن المجال الذى ينشئه القضيب المغناطيسى يكون عادة أكبر مئات المرات من المجال الخاص بالملف اللولبى وحده . تسمى المجموعة المكونة من ملف لولبى وبداخله قطعة من الحديد الرخو **مغناطيسا كهربائيا** .

والآن ، لو أن التيار المار فى الملف اللولبى أزيل لعادت المناطق فى قضيب الحديد الرخو الى حالتها الأصلية تقريبا كما يوضح الشكل (أ) ، فالحركة الحرارية تجعل المناطق تتبعثر . وهذا الموقف مستحب فى حالة المغناطيسيات الكهربائية لأنه يسمح بتشغيله أو وقفه حسب الرغبة . أما قطعة الحديد الصلد – من ناحية أخرى – فانها تحتفظ بمعظم الترتيب ولذا تصبح قضيبا مغناطيسيا دائما كما هو مبين فى الجزء (د) من الشكل ١٩ – ٢٨ .

١٩ – ١٤ منحنى B مقابل H

اعتبر الآن الملف الحلقى المبين فى شكل ١٩ – ٢٩. لو كان هذا الملف قد لف حول قلب خشبى أو حول اية مادة أخرى غير مغناطيسية فان المجال داخل الملف الحلقى سيكون ناتجا بالكلية تقريبا من التيار المار فى السلك . لقد وجدنا فى المعادلة (١٩ – ٨) أن B فى الملف الحلقى كانت ،



شكل ١٩ – ٢٩
تعتمد قيمة B داخل الملف الحلقى على المادة التى يلف حولها الملف

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r} \qquad \text{ملف حلقى}$$

حيث N هى العدد الكلى للعرى بالملف الحلقى .

لو كان علينا أن نلف الملف الحلقى حول قلب حديدى ، فإن المجال الناتج عن التيار سيميل الى مغنطة الحديد ، وتقوم المناطق المغناطيسية التى رتبت بزيادة B زيادة كبيرة داخل الملف الحلقى كما رأينا فى القسم السابق . وفى هذه الحالة فإن المعادلة (١٩ – ٨) لن تبقى صحيحة بالنسبة للمجال داخل المادة ذات المغناطيسية الحديدية والمستخدمة فى الملف الحلقى ، وفى الواقع يجب ضرب المعادلة (١٩ – ٨) فى معامل ضخم لكى نحصل على الكثافة الصحيحة للفيض . من المعتاد أن نكتب ،

ملف حلقى $B = \mu \frac{NI}{2\pi r}$ (١٩ — ٩)

حيث μ **هى الانفاذية المغناطيسية** للمادة التى لف حولها الملف الحلقى .

فى حالة ملف حلقى مجوف فان μ تصبح هى μ_0 ، الانفاذية المطلقة فى الفراغ . وهذه طريقة أخرى للنص على أن المواد غير المغناطيسية لاتغير التدفق كثيرا ، لأن ميل المغناطيسات الذرية الى الترتيب ليس قويا بدرجة كافية لكى يسبب تأثيرات محسوسة . ولكن μ للمواد ذات المغناطيسية الحديدية تكون عادة أكبر مئات المرات من μ_0 ذلك لأنها تزيد B بدرجة هائلة .

من المناسب دائما الفصل بين المجال المغنط الناشىء عن التيار المار فى السلك والمجالات المركبة من التيار ومادة الملف اللولبى ، وعليه فاننا نعرف شدة المجال المغنط أو **شدة المجال المغناطيسى H** على أنها (بداخل الملف الحلقى)

$$H = \frac{B}{\mu}$$

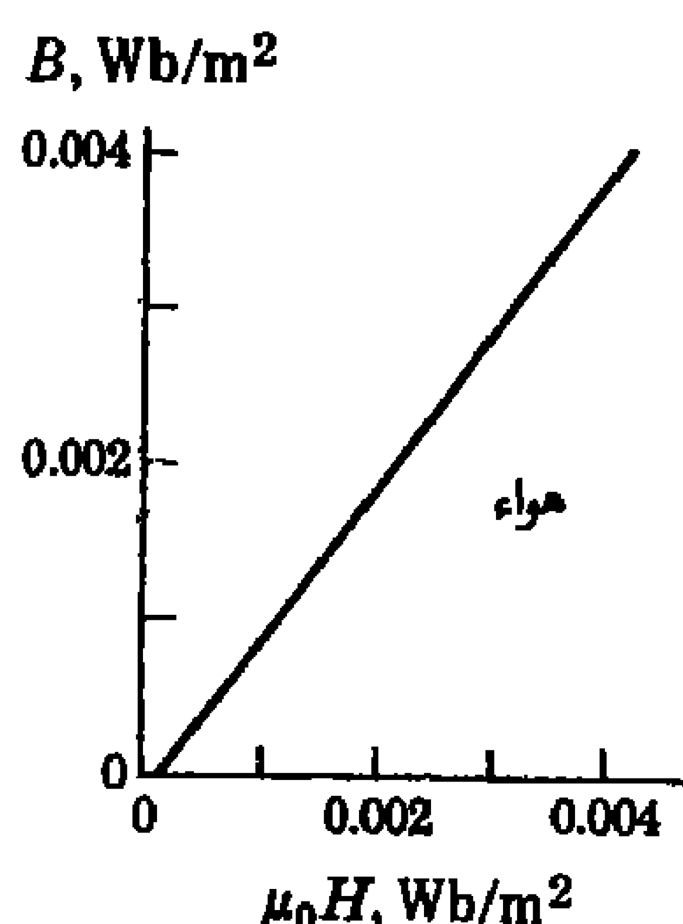
$$B = \mu H \qquad (١٠ — ٩)$$

لاحظ ان المعادلة ١٩ — ٩ تؤول الى :

للملف الحلقى $H = \frac{NI}{2\pi r}$ (١٩ — ١١)

ولهذا فان ، شدة المجال المغناطيسى H لاتعتمد على المادة التى يلف حولها الملف الحلقى . والتعريف المعطى هنا للكمية H ليس كاملا فى حالات أخرى غير الملف الحلقى أو فى الفراغ فلو أن الأقطاب غير المتوازنة والتى تظهر على السطح او داخل قضبان حديدية كانت موجودة كما فى حالة قضيب مغناطيسى فان H تعرف على أنها تجميع لتأثيرات التيار فى السلك وكذا تأثيرات الأقطاب . وقد تظهر بعض المضاعفات ايضا فى حالة مناطق فى حالة عدم اتزان حيث أن قيمة B فى ملف حلقى مجوف هى $\mu_0 H$ ، لذا من المعتاد أن نعبر عن التأثير المغناطيسى لمادة ما وذلك بمقارنة $\mu_0 H$ مع قيمة B الموجودة فعلا داخل الملف الحلقى . والكمية $\mu_0 H$ يمكن حسابها بمعرفة أبعاد الملف الحلقى والتيار المار فيه بواسطة المعادلة (١٩ — ١١) . وسنرى فيما بعد أن B فى الملف الحلقى يمكن قياسها بسهولة تامة ، ومن ثم يمكن رسم المنحنى المسمى منحنى B مقابل H للمادة . (قد يكون

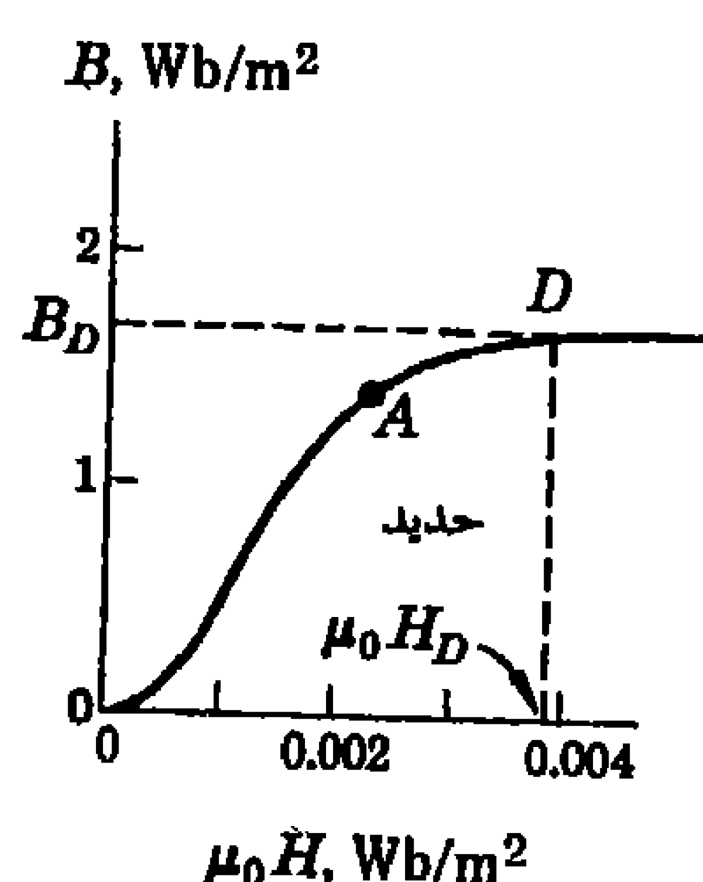
من الأحسن رسم منحنى B مقابل $\mu_0 H$ فى نظام الوحدات المتبع لدينا على الرغم من أن الفرق الوحيد هو فى الكمية μ_0، التى تضرب فى كل قيمة من قيم H) .



شكل ١٩ – ٣٠
منحنى B مقابل H وهذا يخص ملفا حلقيا ذا قلب هوائى . قارنه بالشكل ١٩ – ٣١

لنرسم أولا منحنى B مقابل $\mu_0 H$ للهواء . بما أن الهواء ليس له خواص مغناطيسية محسوسة لذا فقيمة μ للهواء هى بالضرورة μ_0، وتفيدنا المعادلة (١٩ – ١٠) أن $\mu_0 H = B$ للهواء ، ويكون منحنى B مقابل $\mu_0 H$ كما هو مبين فى الشكل (١٩ – ٣٠) وكما رأينا فى المثال التوضيحى ١٩ – ٤ تكون قيمة B داخل ملف حلقى عادى فى حدود $0.003\ wb/m^2$ ، بشرط إلا يكون ملفوفا حول مادة ذات مغناطيسية حديدية . وبما أن $B = \mu_0 H$ فى هذه الحالة ، لذا فان $\mu_0 H$ ، B سيزدادان معا خطوة بخطوة ، فإذا كان أحدهما صفرا فان الآخر يكون صفرا كذلك ويصل الاثنان الى $0.003\ Wb/m^2$ معا .

افترض الآن أن الملف الحلقى ملفوف حول قلب حديدى . حيث أن $\mu_0 H$ لاتعتمد على مادة القلب وأنها ناتجة فقط عن التيار نفسه لذا تتغير الكمية $\mu_0 H$ من الصفر حتى تصل الى $0.003\ Wb/m^2$ فى هذه الحالة أيضا . ولكننا نعلم أن تراص المناطق فى القلب الحديدى يزيد كثيرا من قيمة B عند مرور تيار ضئيل فى السلك ، فان المجال الممغنط الناشيء عن التيار لن يقوم بترتيب كثير من المناطق ، ولكن بزيادة $\mu_0 H$ تستمر المناطق فى التراص مما ينتج عنه زيادة هائلة فى قيمة B . ويصور الشكل ١٩ – ٣١ هذا الموقف .



شكل ١٩ × ٣١
منحنى B مقابل H لملف حلقى ذى قلب حديدى . لاحظ الفرق فى مقياس الرسم الافقى لهذا المنحنى وذلك الذى فى شكل ١٩ – ٣٠

لاحظ أن مقياس رسم B على المحور الرأسى اكبر 500 مرة فى الشكل ١٩ – ٣١ عنه فى الشكل ١٩ – ٣٠ ، ولو أننا حاولنا أن نرسم الخط الموجود فى شكل ١٩ – ٣٠ بمقياس الرسم الموجود فى ١٩ – ٣١ فان الخط سيبدو أفقيا ومارا بالصفر . ويساهم القلب الحديدى بمجال أكبر بكثير جدا عن ذلك الذى يساهم به التيار المار فى السلك .

من الواضح أن المنحنى B مقابل $\mu_0 H$ يستوى فوق النقطة D ويحدث هذا نتيجة لان كل المناطق تقريبا تكون قد رتبت وتراصت عند هذه النقطة . اذا زيدت قيمة $\mu_0 H$ بعد تلك النقطة فان عددا قليلا جدا من المناطق يضاف الى المناطق المتراصة وبذا تظل B ثابته تقريبا ، ويقال فى هذه الحالة أن الحديد قد تشبع ، أى أن جميع المناطق قد تراصت وأن B أصبحت أكبر مايمكن .

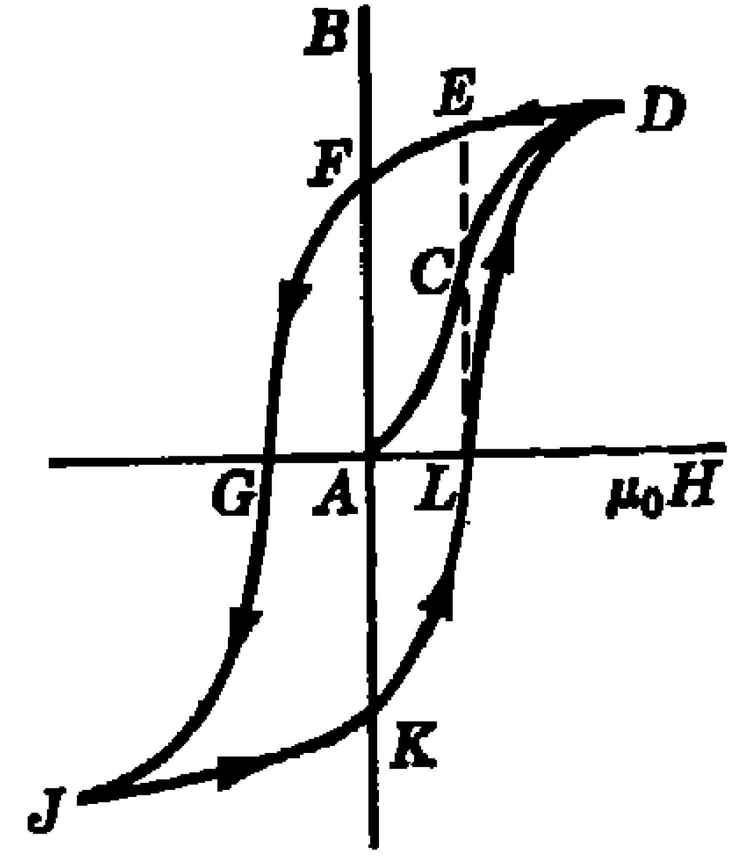
حيث أن الانفاذية المغناطيسية للحديد ، μ ، معرفة بالمعادلة

$$B = \mu H$$

فان قيمتها يمكن أن تتعين من الشكل ١٩ — ٣١ . فعند النقطة D مثلا لدينا قيم معلومة لكل من B ، H وهى القيم B_D، H_D وعندئذ ،

$$\mu_D = \frac{B_D}{H_D}$$

وكنتيجة لحقيقة أن العلاقة التجريبية بين B،H ليست خطا مستقيما بالنسبة للحديد لذا فان μ لن تكون ثابتة وأنما ستتغير بشدة مع H .

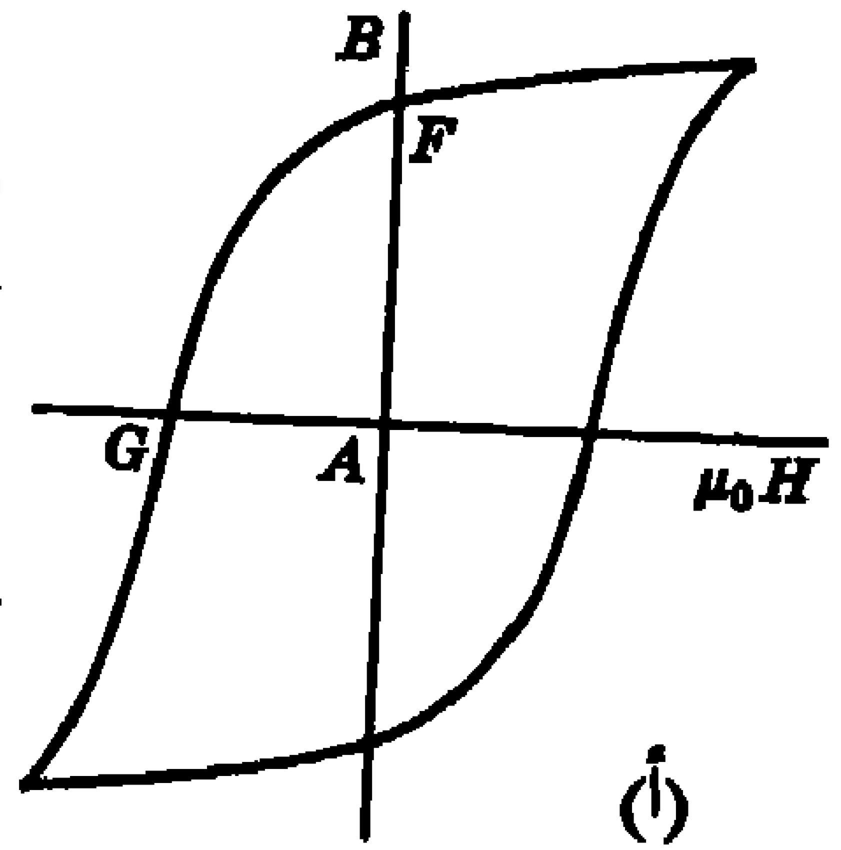


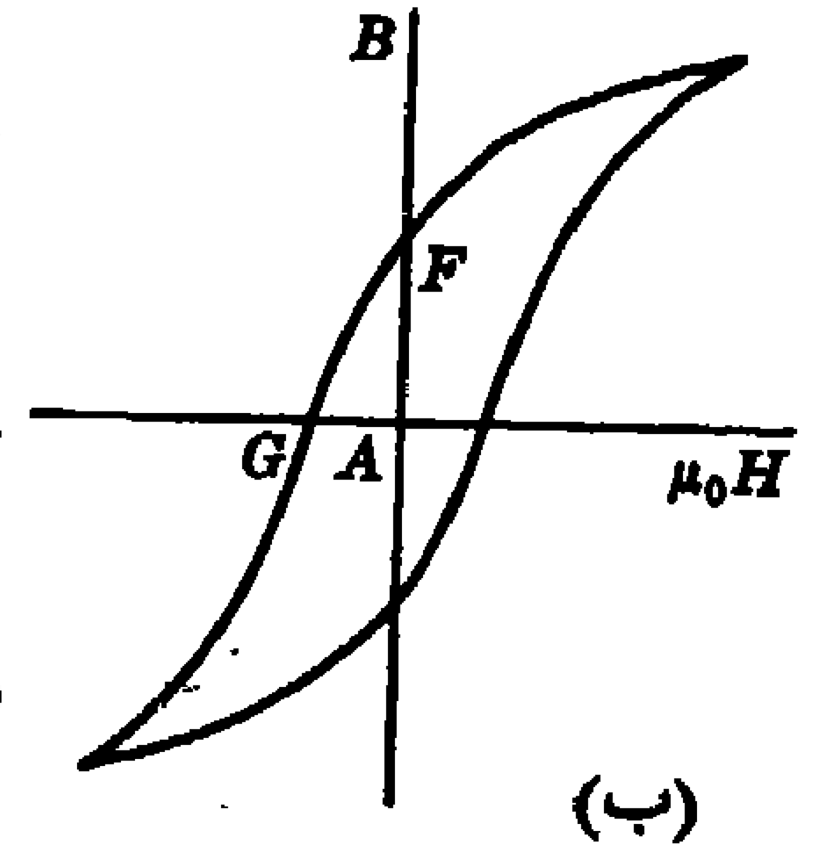
شكل ١٩ — ٣٢
منحنى التخلفية لمادة ذات مغناطيسية حديدية

١٩ — ١٥ منحنى التخلفية

لنعتبر الآن تجربة أخرى باستخدام ملف حلقى ذى قلب حديدى . افترض أننا قمنا بزيادة المجال الممغنط H حتى تشبع الحديد ، سنكون عندئذ عند النقطة D فى الشكل ١٩ — ٣٢ . لو أننا الان خفضنا من التيار فى الملف الحلقى ، فإن $\mu_0 H$. سوف تتضاءل . ولكن حيث أن هناك احتكاكا — قل أو كثر — بين المناطق لذا فإن هذه المناطق ستميل الى البقاء مرتبة ، ومن ثم لن تقل قيمة B بشكل ضخم وقد تعود الى النقطة E على المنحنى بدلا من أن تعود الى النقطة C .

لو أن التيار أطفىء فى الملف الحلقى فان بضع مناطق ستبقى متراصة وستكون عند النقطة F على المنحنى ، أما اذا عكس التيار المار فى الملف الحلقى ، فإن المجال $\mu_0 H$ يصبح سالبا ويكون قادرا فعلا على ادراة عدد كاف من المناطق حتى تصبح B صفرا كما هو مبين عند النقطة G . وكلما أصبح المجال الممغنط $\mu_0 H$ أكثر سالبية ، فإن الحديد يصبح فى النهاية مشبعا فى الاتجاه العكسى وهذا ماتشاهده عند النقطة J .





شكل ١٩ — ٣٣
المادة التى لها أنشوطة تخلفية كالتى فى الجزء (أ) يصنع منها مغناطيس دائم أفضل من التى لها انشوطة كالتى فى (ب) لماذا ؟

عند خفض التيار المار فى الملف الحلقى مرة أخرى الى الصفر فاننا نتتبع النقط J،K،L عائدين الى النقطة D على المنحنى ونكون بذلك قد انتهينا الى الحديد وهو ممغنط كما كان فى البداية . على أن تغيير حالة الحديد خلال الدورة D,L,K,J,B,F,D استلزم فقد كثير من الطاقة على هيئة شغل احتكاكى بذل فى دوران المناطق وكذا فى تحريك جدرانها . يمكن للإنسان أن يثبت أن الاحتكاك والشغل المبذول يتناسبان مع مساحة هذه العروة المسماه **أنشوطة التخلفية** (hysteresis loop) ويظهر هذا الشغل على هيئة حرارة داخل الحديد .

يبدو أن أفضل المواد لصنع مغناطيس دائم هى تلك التى لها أنشوطة تخلفية كتلك التى فى الشكل (١٩ — ٣٣)أ . هذه المادة تعتبر ذات مزايا هامة لأن لها **محتفظية** (retentivity) وهو الطول AF. ولأنها تحتاج الى **قوة مغناطيسية قهرية** (coercive force) لازالة مغنطتها ، ومن ثم فإن هذه المادة تكون مغناطيسا قويا (كثير

من التدفق خلالها) ويكون من الصعب إزالة مغنطتها (وهى بهذا تكون مغناطيسا دائما) .

من ناحية أخرى يحتاج الحديد المستخدم فى المغناطيس الكهربائى أن تكون له انشوطة تخلفيه كالتى فى الشكل (١٩ - ٣٣ب) (لماذا ؟) . سنرى فى الفصل القادم أن المحرك والمولد يجب أن تصنع قلوبهما من حديد من هذا النوع . (هل هذا الحديد رخو أم صلد ؟) .

ملخص

الابرة المغناطيسية هى قضيب مغناطيسى دقيق . الطرف الذى يشير الى الشمال هو قطبها الشمالى . تتنافر الاقطاب المغناطيسية المتشابهة وتتجاذب الاقطاب المختلفة . لكل مغناطيس دائما قطبان أحدهما شمالى والآخر جنوبى . تؤثر المجالات المغناطيسية على الأقطاب المغناطيسية بقوى معينة . تقوم ابرة البوصلة بالاصطفاف مماسة لخطوط المجال المغناطيسى . تخرج هذه الخطوط من الأقطاب الشمالية وتدخل فى الأقطاب الجنوبية للمغناطيسات . يتعرض سلك مستقيم طوله L ويحمل تيارا I لقوة مقدارها $F = B_{\perp}IL$ اذا وضع فى مجال مغناطيسى شدته B والكمية $B_{\perp}$ هنا هى مركبة B العمودية على السلك . وحدات كثافة الفيض B (أو الحث المغناطيسى) هى webers لكل square meter وهذه الوحدة هى نفسها tesla (T) يتعين مستوى مابتقاطع خطوط B مع L وتكون القوة فى اتجاه متعامد مع هذا المستوى ويعطى بقاعدة اليد اليمنى المعدلة .

تتعرض الشحنات المتحركة ايضا لقوة فى المجال المغناطيسى ، وتعطى هذه القوة بالمعادلة $F = qB_{\perp}v$ حيث $B_{\perp}$ هى مركبة B العمودية على السرعة v . يكون اتجاه القوة هو نفس اتجاه القوة المؤثرة على التيار المكون من جسيمات متحركة . تتحرك الشحنة التى لها سرعة v عمودية على مجال مغناطيسى B بحيث يكون مسارها دائريا . يمكن ايجاد نصف قطر المسار الدائرى بمساواة القوة المغناطيسية مع قوة الجذب المركزية . .

أتفق على رسم عدد $\vec{B}$ من خطوط المجال المغناطيسى خلال وحدة مساحات عمودية على المجال ، ويكون التدفق ϕ خلال مساحة قدرها A هو عدد الخطوط التى تمر خلال هذه المساحة . يمكن حساب التدفق من المعادلة $\phi = B_{\perp}A$.

يمكن استخدام قانون أمبير للدوائر فى حساب المجالات المغناطيسية الناشئة عن تيارات . ويكون المجال خارج سلك مستقيم طويل هو $\mu_0 I/2\pi r$ ، أما المجال فى ملف لولبى طويل فهو $\mu_0 nI$.

لاتغير معظم المواد من قيمة المجال المغناطيسى كثيرا حين توضع فيه ، ولكن المواد ذات المغناطيسية الحديدية فتزيد من المجالات المغناطيسية كثيرا حين توضع فيها . ولهذه الموادأجزاء تكون جيدة الترتيب بالنسبة للذرات تسمى مناطق وكل منطقة تعمل مثل مغناطيس . يمكن للمناطق أن تتراص وذلك بوضع المادة فى مجال مغناطيسى قوى .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ - أن تخطط المجال المغناطيسى بجوار (أ) المغناطيسات المختلفة ، (ب) سلك مستقيم ، (جـ) عروة من السلك ، (د) ملف لولبى ، (هـ) ملف حلقى .

٢ - أن تستعمل بوصلة فى تحديد خطوط المجال المغناطيسى فى حيز معين .

٣ - أن توجد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على سلك مستقيم يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى محدد .

٤ - أن تستعمل المعادلة $F = B_{\perp}IL$ لايجاد احدى الكميات اذا علمت الكميات الاخرى .

٥ – أن تستعمل المعادلة $F = qB_{\perp}v$ لإيجاد إحدى الكميات إذا علمت الكميات الأخرى وأن تصف بطريقة كمية المسار الذى يتبعه جسيم له شحنة q وسرعة v معروفتان ويتحرك عموديا على مجال مغناطيسى معين .

٦ – أن تعين التدفق خلال مساحة معينة عندما تكون B معلومة فى تلك المنطقة

٧ – أن تحسب المجال المغناطيسى لسلك طويل مستقيم وللملف لولبى إذا أعطيت البيانات الكافية .

٨ – أن تستطيع – إذا أعطيت قائمة بمواد شائعة – اختيار بعضها الذى يكون قادرا على إجراء تغيير كبير فى المجال المغناطيسى الذى يوضع فيه .

٩ – أن تشرح معنى المناطق المغناطيسية وأن تصف بدلالتها مايحدث لقضيب من مادة ذات مغناطيسية حديدية حين تمغنط أو تزال مغنطتها .

١٠ – أن ترسم منحنى المغنطة لمادة غير مغناطيسية وأخرى ذات مغناطيسية حديدية ، وأن تشرح الملامح الرئيسية لكل منحنى .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

تتجاذب الأقطاب المختلفة وتتنافر الأقطاب المتشابهة .

خط المجال المغناطيسى

قاعدة اليد اليمنى

gauss, Webers/square meter, Tesla , $F = B_{\perp}IL$

كثافة التدفق ، الحث المغناطيسى

القوة المغناطيسية لاتبذل أى شغل

منتقى السرعات

يوجد قطب جنوبى بالقرب من القطب الشمالى للأرض

التدفق ، $\phi = B_{\perp}A$

قانون أمبير للدوائر

$B = \mu_0 I/2\pi r;\ B = \mu_0 nI$

نظرية أمبير للمغناطيسات ، توجد الأقطاب ازواجا

المواد ذات المغناطيسية الحديدية ، المناطق

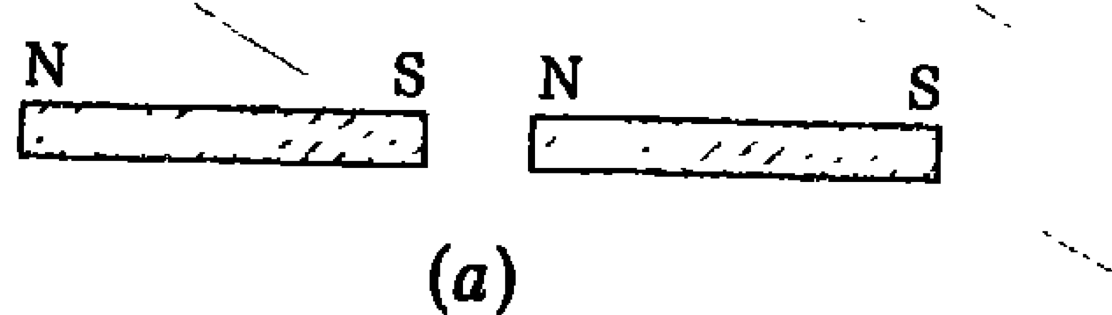
منحنى المغنطة

منحنى التخلفية

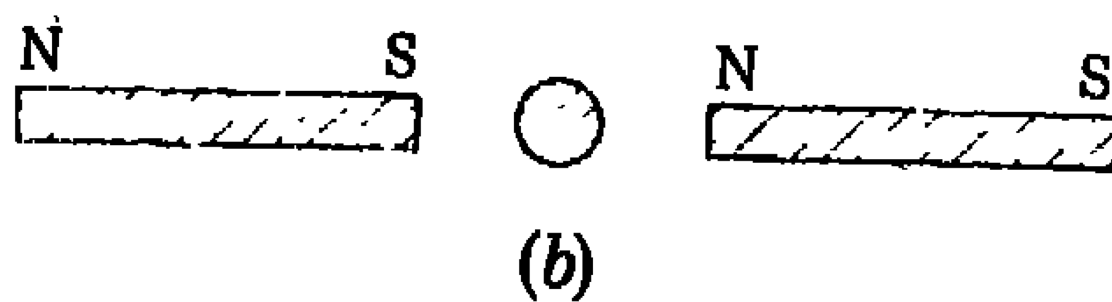
أسئلة وتخمينات

١ – خطط المجال المغناطيسى لقضيبين مغناطيسيين متماثلين وموضوعين كما فى الشكل (م١٩ – ١أ) ، خطط المجال المغناطيسى للموقف المبين فى الجزء (ب) اذا كانت القطعة المعدنية المستديرة من الحديد . أعد باعتبارها من النحاس الأصفر .

٢ – يقوم المغناطيس بجذب مسمار غير ممغنط من الحديد ويقوم المسمار بجذب آخر . اشرح لماذا ؟



(a)



(b)

٣ – تستقر عروة دائرية على المنضدة وهى تحمل تيارا يدور فى اتجاه عقربى الساعة كما سبق . يستقر قضيب مغناطيسى رأسيا فى مركز العروة بحيث يكون قطبه الشمالى على المنضدة ، بينما يكون قطبه الجنوبى فوق الشمالى تماما . صف القوة المؤثرة على العروة والتى يسببها المغناطيس .

٤ – تستقر عروتان دائريتان على منضدة وهما متحدتا المركز . تحمل العروة الكبرى تيارا قدره 10A فى اتجاه ضد حركة عقربى الساعة بينما تحمل الصغرى تيارا قدره 5A فى اتجاه عقربى الساعة . صف القوة المؤثرة على كل عروة .

٥ – يقوم طرفا جهد مرتفع بالتسبب فى أن شعاعا من الجسيمات المشحونة ينطلق إلى اليمين خلال أنبوبة مفرغة جزئيا كما هو موضح فى الشكل م (١٩ – ٢) . يظهر مسار الشعاع على ستار فلورى موضوع بطول الأنبوبة . ينحرف الشعاع كما هو مبين ، عندما يقترب مغناطيس على هيئة حذاء الفرس من الأنبوبة . كيف يمكنك تحديد إشارة الشحنة على الجسيمات ؟

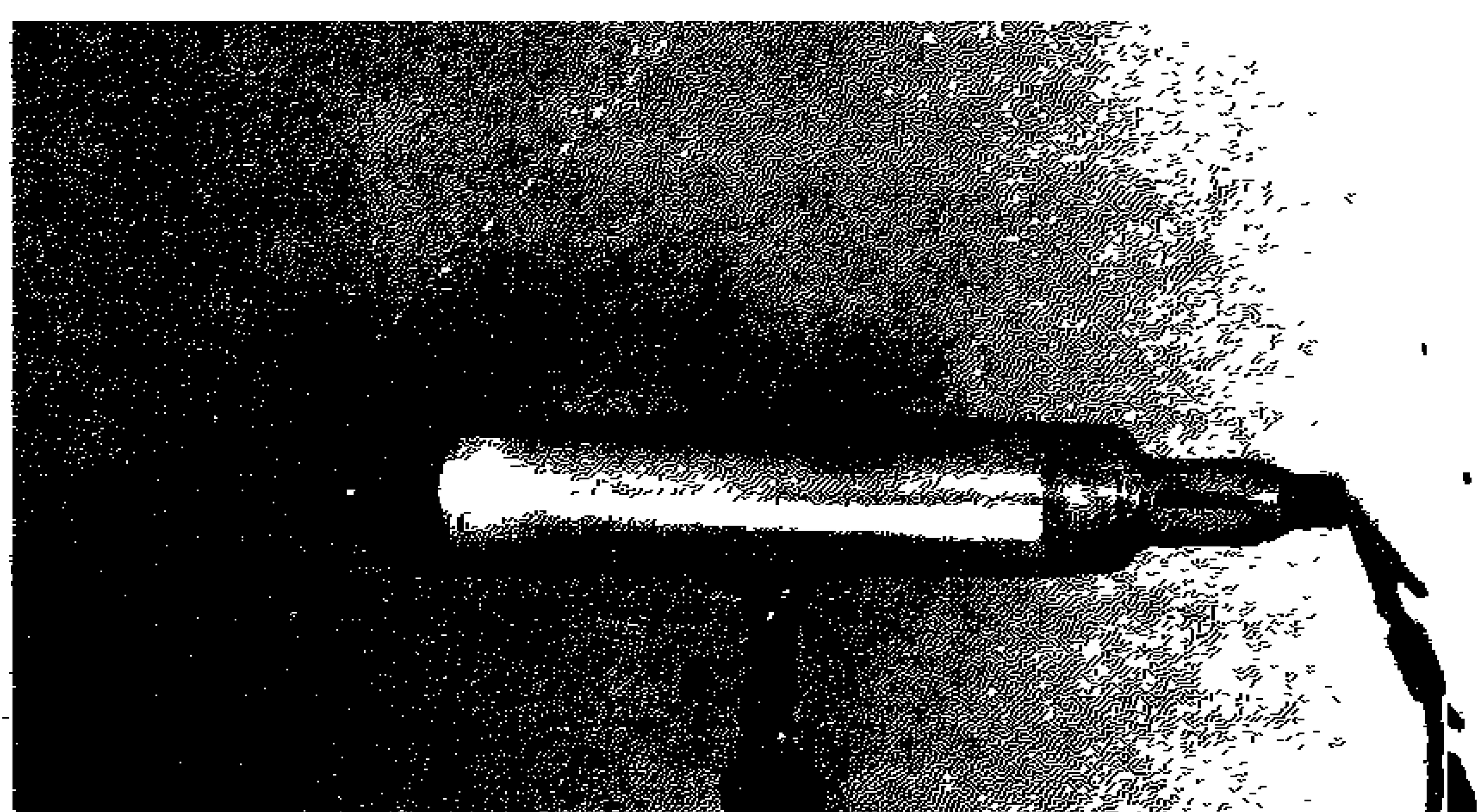
٦ – قذف الكترون داخل ملف لولبى طويل فى اتجاه يصنع زاوية صغيرة من محور الملف . صف حركة الالكترون .

٧ – لماذا لايمكن الحصول على قطب شمالى منفرد وذلك بكسر مغناطيس إلى قطعتين ؟

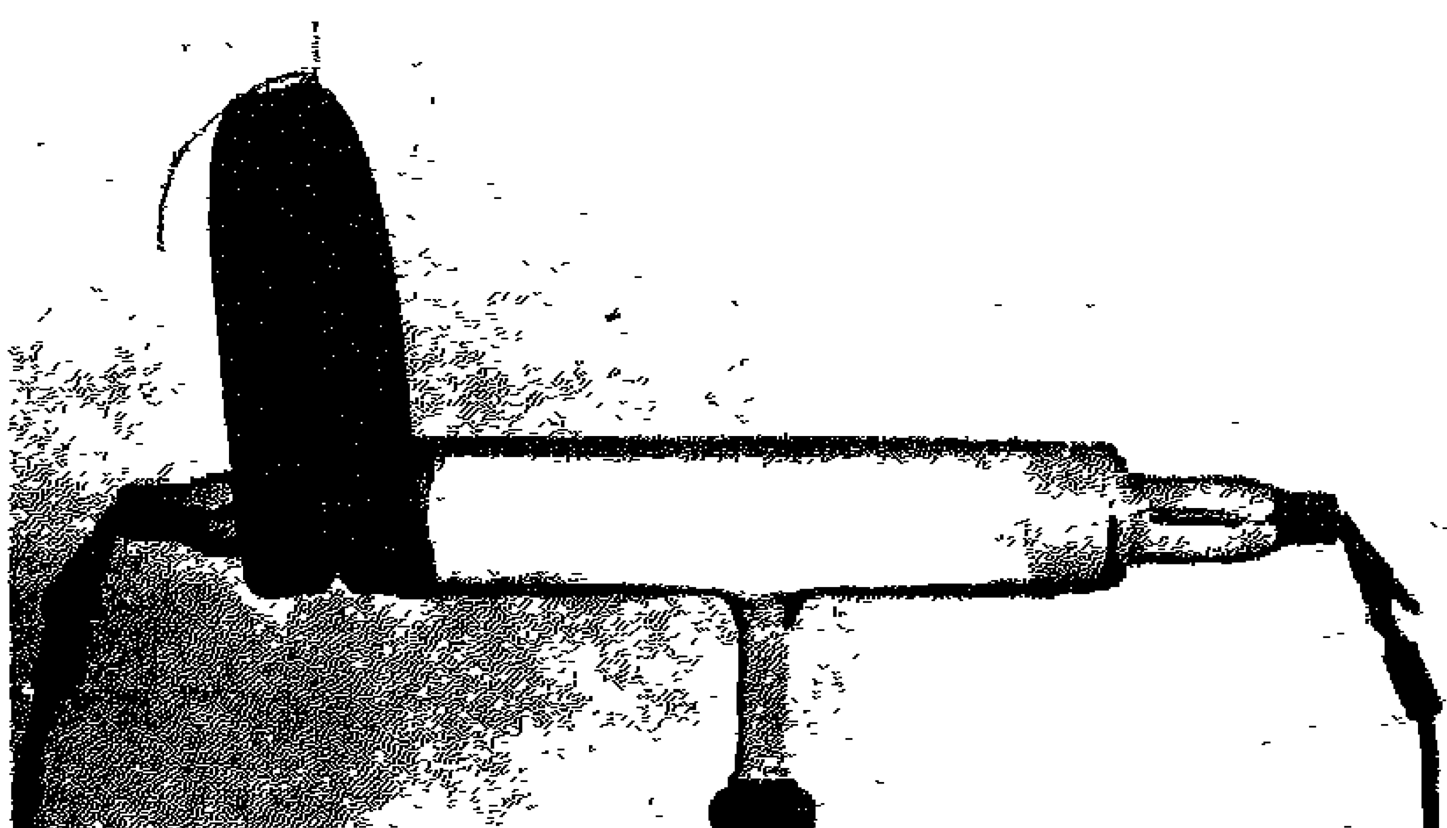
٨ – يتعرض سلك يحمل تيارا فى المجال المغناطيسى للأرض لقوة تتجه إلى أعلى وذلك لو كان متجها فى الاتجاه الصحيح . هل من الممكن الإمساك بمنطاد عن طريق إمرار تيار هائل خلال قضيب معدنى مثبت بالمنطاد ؟ ناقش هذا الأمر .

٩ – قذف جسيم موجب الشحنة وقادم من الفضاء نحو خط الاستواء للأرض على طول خط نصف قطرى متعامد مع المحور المغناطيسى للأرض . صف حركة هذا الجسيم . اوجد بالتقريب (لأقرب قوى العشرة) مقدار السرعة التى يجب أن تكون لدى بروتون ليصل إلى الأرض على طول مثل هذا الخط لو أهملنا تصادماته مع جزيئات الهواء . كرر العملية بالنسبة لجسيم مقذوف على طول المحور .

١٠ – قدر أثر المجال المغناطيسى للأرض على الشعاع الالكترونى فى جهاز تليفزيون .



(a)



(b)

مسائل

١ – يحمل خط قدرة (power line) مواز لسطح الأرض تيارا قدره 20 A فى اتجاه الغرب . وكان المجال المغناطيسى للأرض عند تلك النقطة 0.80 G موازيا لسطح الأرض ومتجها شمالا .

(أ) اوجد القوة الناشئة عن المجال والمؤثرة على طول من السلك يبلغ 15m . (ب) ماهو اتجاه القوة ؟

٢ – أعد المسألة رقم (١) إذا كان السلك الذى يحمل تيارا يصنع زاوية 30° شمال الغرب .

٣ – فى ميامى بفلوريدا يكون المجال المغناطيسى للأرض شماليا تقريبا ولكنه يصنع زاوية مقدارها 57° أسفل خط الأفق (زاوية الميل 57°) ، ويبلغ مقداره حوالى 0.51G . اوجد (أ) مقدار القوة التى يسببها هذا المجال على سلك طوله 15m يحمل تيارا مقداره 20 A يتجه مباشرة إلى أعلى .(ب) ماهو اتجاه هذه القوة

٤ – يحمل خط خاص للقدرة (power line) تيارا منتظما قدره 50A تحت جهد 1000V مواز للأرض ويتجه شمالا فإذا كان المجال المغناطيسى للأرض يبلغ 0.60G عند تلك النقطة وكانت زاوية الميل 53° ، (أ) اوجد القوة المؤثرة على طول من سلك قدره 3m ، (ب) ماهو اتجاه هذه القوة ؟

٥ – يحمل سلك طويل مستقيم تيارا قدره 12A فى اتجاه الغرب مباشرة على طول أرضية منزل ما . (أ) ماهى قيمة B على مسافة قدرها 2m فوق السلك ؟ (ب) ماهو اتجاهها ؟

٦ – ماهى قيمة B داخل ملف لولبى طويل يحتوى على 1000 لفة وطوله 50 cm ، إذا كان يحمل تيارا قدره 3A ؟

٧ – يبلغ نصف قطر ملف حلقى ضيق 10 cm وكان هناك 200 لفة من السلك عليه . ماهو مقدار التيار المار فيه إذا كانت B بداخله تساوى $0.5 wb/m^2$ ؟

٨ – إذا كان الملف الحلقى فى المسألة رقم (٧) ملفوفا على قلب حديدى بحيث كانت $\mu/\mu_0 = 300$ فماهى قيمة التيار الذى يحدث B مقدارها 0.50T . ؟

٩ – ملف لولبى خاص ذو قلب هوائى يبلغ طوله 2.0m ويحتوى على 10,000 لفة من السلك الملفوف حوله ، وكان قطر مقطعه يساوى 3.0 cm . (أ) إذا مر تيار قدره 5.0 A فى السلك فما هو مقدار كثافة التدفق المغناطيسى فى الجزء الأوسط من الملف اللولبى ؟ (ب) كرر الحسابات اذا كان الملف اللولبى قد لف حول قلب حديدى وكانت $\mu = 50\,\mu_0$ (حـ) ماهو التدفق الذى يمر خلال الملف اللولبى فى الجزء (أ) ؟

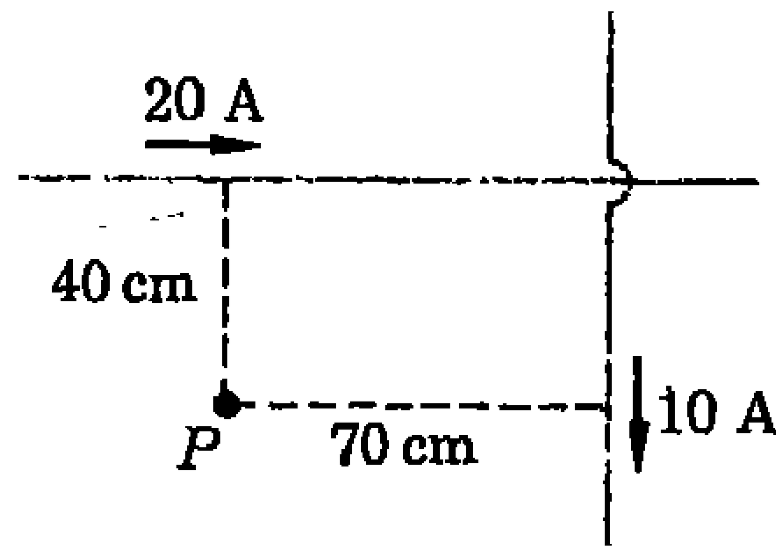
١٠ – يحمل سلك مستقيم تيارا قدره 10A ويقع على طول محور ملف لولبى طويل وكانت B بداخله تبلغ $0.2\ Wb/m^2$. ماهو مقدار القوة المؤثرة على طول 1.0 cm من السلك ؟

١١ – يحمل سلكان متوازيان طويلان ومستقيمان ، المسافة بينهما 10 Cm تيارات تبلغ 10A ، 20A فى اتجاهين متضادين . (أ) ماهى قيمة B الناشئة عن السلك ذى الـ 10 A عند موضع السلك الآخر ؟ (ب) اوجد مقدار واتجاه القوة على طول 1m من السلك الذى يحمل 20A (حـ) كرر الجزء (ب) للسلك الآخر .

١٢ – اوجد قيمة B فى منتصف المسافة بين سلكين طويلين مستقيمين ومتوازيين (بينهما مسافة 20 cm) إذا كانا يحملان تيارات قدرها 10A ، 20 A فى (أ) اتجاهين متضادين و(ب) فى نفس الاتجاه .

١٣ –* يحمل سلك مستقيم طويل تيارا قدره 20A على طول محور ملف لولبى يبلغ المجال المغناطيسى بداخله 5.0 G (فى حالة غياب السلك) . اوجد مقدار المجال المغناطيسى على مسافة تبلغ 0.4m من محور الملف اللولبى . نصف قطر الملف اللولبى 0.5cm .

١٤ – اوجد قيمة B عند النقطة P فى شكل (م١٩ – ٠٣)



شكل م ١٩ - ٣

١٥ -* بالنسبة للموقف المبين فى الشكل م ١٩ - ٣ ، اين يكون المجال المغناطيسى صفرا ؟

١٦ - يتحرك الكترون بسرعة مقدارها 10^7 cm/s فيدخل فى مجال مغناطيسى منتظم ($B = 0.020$ T) فى اتجاه متعامد مع المجال . صف المسار الذى يسلكه الالكترون بطريقة كمية .

١٧ - ينحدر بروتون من السكون خلال فرق للجهد مقداره 3.34×10^5 V ثم يدخل منطقة بحيث يكون متعامدا مع مجال مغناطيسى $B = 0.50$ Wb/m². ماهو مقدار نصف قطر الدائرة التى يتحرك فيها البروتون ؟
البرتون هو نواة الايدروجين . تبلغ شحنته $+1.6 \times 10^{-19}$ C. أما كتلته فهى 1.67×10^{-27} kg

١٨ - عجل بروتون خلال فرق مجهول للجهد ثم دخل منطقة ما عموديا على مجال مغناطيسى قدره 2.00×10^{-2} Wb/m² متخذا مسارا دائريا نصف قطره 30.0cm ماهى طاقة البروتون معبرا عنها بوحدات الالكترون - فولت ؟

١٩ - صف بطريقة كمية مسار الكترون يتحرك بسرعة مقدارها 10^7 m/s نحو الغرب موازيا للأرض حيث كانت $B \doteq 0.5$ G وكانت زاوية الميل °53 .

٢٠ -** يبلغ المجال المغناطيسى فى ملف لولبى طويل 30 G . قذف الكترون إلى داخل الملف بزاوية مقدارها °10 مع محور الملف اللولبى بسرعة مقدارها 5×10^6m/s فاتخذ مسارا حلزونيا . ماهو نصف قطر وخطوة الحلزون ؟

٢١ - * يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 10^5 m/s فيدخل الى حيز من الفراغ حيث يوجد مجال مغناطيسى مقداره 0.100T . تصنع سرعة البروتون زاوية مقدارها °30 مع اتجاه B . صف مسار البروتون بطريقة كمية . تلميح حلل السرعة الى مركبتين احداهما عمودية والاخرى موازية للمجال . المركبة الموازية لن تتفاعل مع المجال ، أما العمودية وحدها فستجعل الجسيم يتحرك فى دائرة .

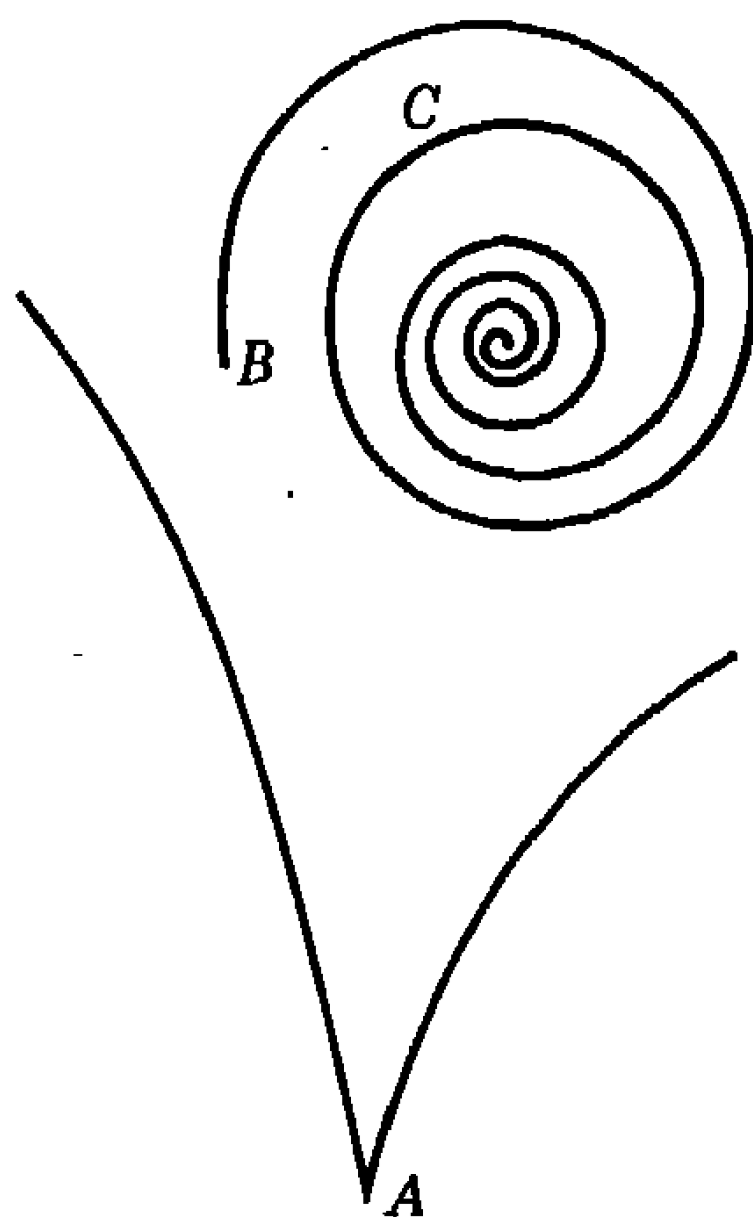
٢٢ - * لقد وجد أن شعاعا معينا من الالكترونات يتحرك فى خط مستقيم خلال مجالين متقاطعين احدهما مغناطيسى والآخر كهربائى فى مكثف كالموضح فى الشكل ١٩ - ١٣ . كانت قيمة B تبلغ 0.050 Wb/m². وكانت المسافة بين اللوحين 10 cm وفرق الجهد بينهما 100 V اوجد (أ) سرعة الالكترونات (ب) نصف قطر الدائرة التى ستتحرك فيها الالكترونات عند خفض فرق الجهد بين اللوحين الى الصفر .

٢٣ - * قذف شعاع الكترونى اسطوانى ضيق خلال أنبوبة تليفزيون فكون نقطة من الضوء على الستار ، فاذا كان التيار الذى يحمله الشعاع هو 0.10mA فاوجد (أ) عدد الالكترونات التى تصدم الستار كل ثانية ، (ب) قيمة B على بعد نصف قطر قدره 2 cm من الشعاع . (ح) بالنسبة لشخص يشاهد التليفزيون هل يدور B مع عقربى الساعة أم ضدهما حول الشعاع كمحور ؟

٢٤ -* عندما يقذف جسيم يتحرك بسرعة كالالكترون خلال ايدروجين سائل فوق مسخن فإن فقاعات تتكون على طول مسار الجسيم . يبين الشكل م ١٩ - ٤ مسارات لجسيمات متعددة فى مثل حجرة الفقاعات تلك . تنحنى المسارات بسبب المجال المغناطيسى العمودى على الصفحة والمتجة الى داخلها . اعتبر أن المجال يساوى 20G . هل الجسيم الذى يغادر النقطة A يتحرك نحو اليمين موجب أم سالب ؟ اذا اعتبرنا أنه الكترون فما هى سرعته بالتقريب ؟ (الآثار المبينة لها نفس الحجم الفعلى ولنا أن نعتبرها فى مستوى الصفحة) .

٢٥ ـ* يبطىء الجسيم الذى يبدأ من B فى الشكل م ١٩ – ٤ حين يتحرك خلال الايدروجين السائل ونتيجة لهذا يلتف حلزونيا للداخل . باعتبار نفس البيانات المذكورة فى المسألة (٢٤) واعتبار الجسيم الكترونا ، فما هى سرعته عند C ؟

شكل م١٩ – ٤



الفصل العشرون

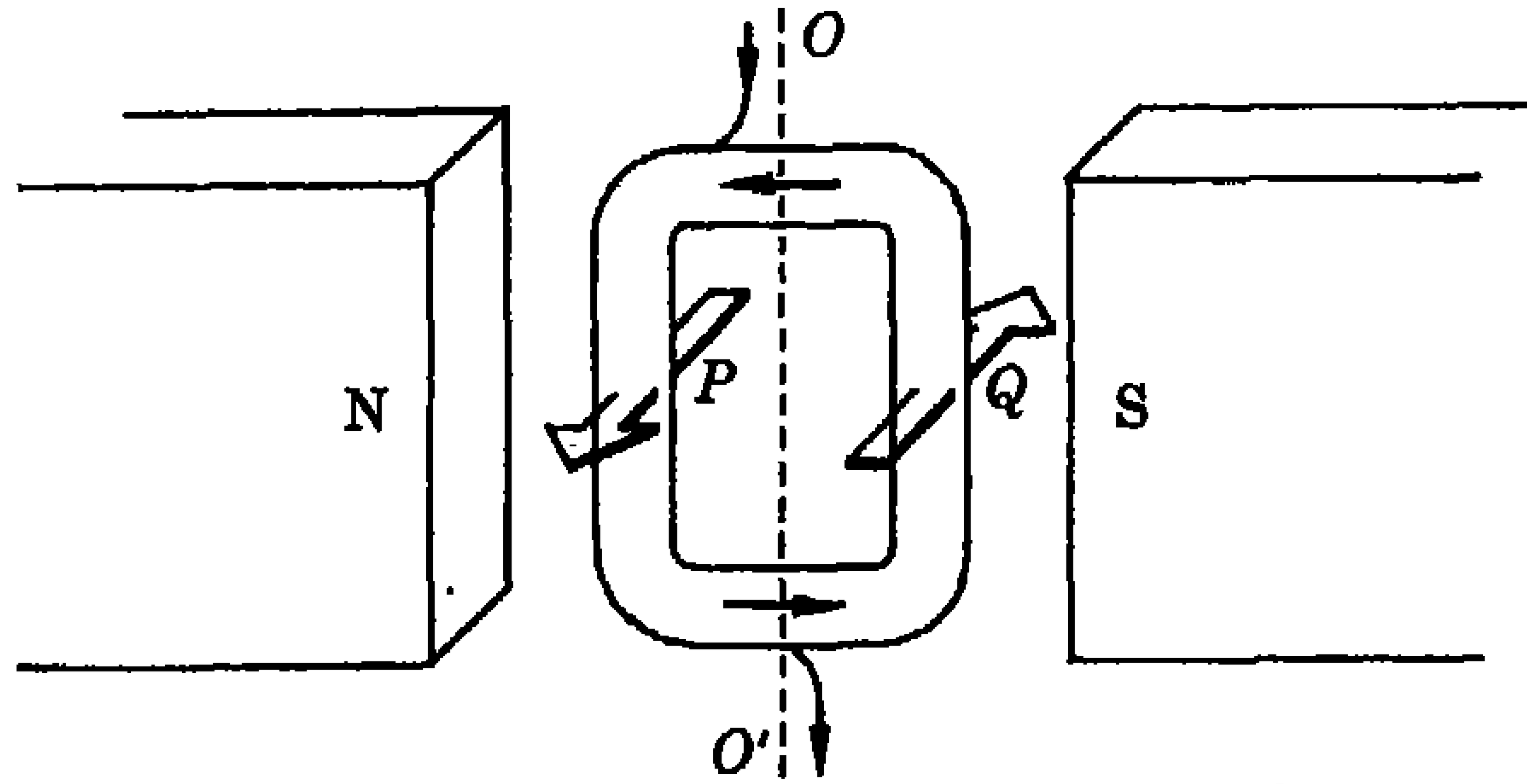
الأجهزة الميكانيكية الكهربائية

رأينا فى الفصل السابق أن السلك الذى يحمل تيارا خلال مجال مغناطيسى يتعرض لقوة ما ، ويستفاد من هذه الحقيقة فى عمل أجهزة القياس الكهربائية والمحركات وكذلك فى كثير من الأجهزة الكهربائية . سنناقش فى هذا الفصل عمل بعض هذه الأجهزة وسنبحث أيضا كيفية جعل تيار يمر فى ملف ما عن طريق تغيير التدفق خلاله . تعتبر هذه الظاهرة أساسية لفهم المولدات الكهربائية وكذا فى عمل المحاثات . ستظهر أهمية التيارات والجهود المستحثة فى الفصل القادم حين نبدأ فى دراسة التيارات المترددة ودوائر الرنين .

٢٠ - ١ الجلفانومتر

تعتبر معظم أجهزة المعامل من اميترات وفولتميترات جلفانومترات معدلة وتعمل جميعا بنفس الطريقة من حيث المبدأ . تتكون هذه الأجهزة - بالضرورة - من ملف من السلك معلق فى مجال مغناطيسى . حين يسرى التيار فى السلك ، يتعرض الملف لقوة نتيجة لتفاعل التيار مع المجال المغناطيسى وتعمل هذه القوة على إدارة الملف ، وتستخدم الحركة الدورانية للملف كمقياس للتيار الذى يمر فيه .

يبين الشكل ٢٠ - ١ رسما تخطيطيا لملف جلفانومتر . يمر التيار فى السلك العلوى ، دائرا حول العرى العديدة للملف ثم يخرج من السلك السفلى . ويكون تركيب الملف بطريقة معينة بحيث يدور حول الخط OO' كمحور . يقوم المغناطيس الدائم بخلق مجال B من اليسار إلى اليمين عبر الملف . ولما كان الجزء العلوى والسفلى للملف يحملان تيارا موازيا للمجال المغناطيسى ، فان $B_{\perp} = 0$ والقوة المؤثرة عليهما تساوى صفرا .

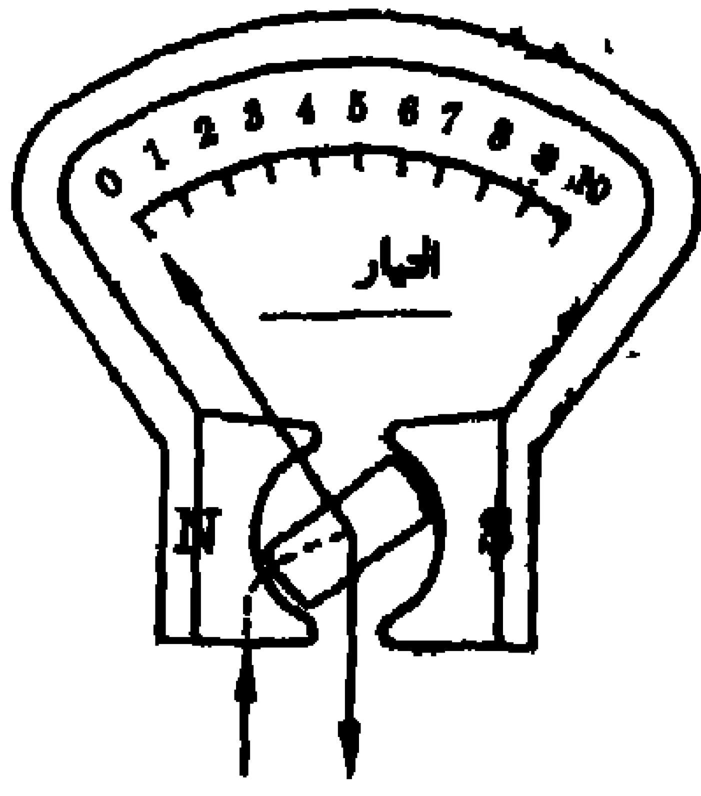


شكل ٢٠ - ١
يقوم التيار المار فى ملف الجلفانومتر بجعل الملف يتحرف فى المجال المغناطيسى

تفيدنا قاعدة اليد اليمنى لإيجاد القوى المؤثرة على الأسلاك بأن الجانب P للملف سيتعرض لقوة متجهة خارج الصفحة ، أما الجانب Q فيتعرض لقوة متجهة لداخل الصفحة. على الرغم من أن هذه القوى هى بالضرورة متساوية ومتضادة إلا أنها تؤثر بعزم لى على الملف . عند دوران الملف يقوم بلى زنبرك ، يقوم بدوره بمعاكسة دوران الملف . ويكون عزم لى الاستعادة الذى يسببه الزنبرك مساويا لعزم اللى الذى يسببه التيار المار فى الملف . حيث أن القوة المؤثرة على السلك ومن ثم عزم اللى يتناسب طرديا مع التيار I ، لذا تتناسب الزاوية التى يدور بها الملف ضد زنبرك الاستعادة تناسبا طرديا مع I بشرط أن يخضع الزنبرك لقانون هوك .

هناك طرق مختلفة لملاحظة الزاوية التى يدور بها الملف ، فقد تثبت مرآة صغيرة على الملف فى أكثر الجلفانومترات حساسية وعند عكس شعاع ضوئى على هذه المرآة

تكون حركة هذا الشعاع متناسبة مع زاوية دوران الملف . وهناك نظام أكثر شيوعا يتم فيه تثبيت إبرة على الملف وعند دوران الملف تنحرف الأبرة ويكون انحرافها – وهو دالة للتيار المار بالملف – مقياسا للتيار المار فى ملف الجهاز بشرط أن يعاير تدريج الجهاز طبقا لانحراف الإبرة . يوضح الشكل ٢٠ – ٢ منظرا علويا لأحد هذه الأجهزة .



شكل ٢٠ – ٢
رسم تخطيطى للأميتر

نشاهد فى حركة الجهاز المبين فى شكل ٢٠ – ٢ أن أقطاب المغناطيس الدائم قد شكلت بطريقة خاصة حتى يكون المجال المغناطيسى موازيا لمستوى الملف أيا كان الملف أثناء دورانه بالزوايا المسموحة وهو بهذا يعطى عزم لى أكثر انتظاما ، ويكون هناك عادة قلب حديدى للملف حتى يزيد من المجال المغناطيسى وحتى يكون مكملة لشكل الأقطاب . ويمكن بالتصميم الجيد جعل تدريج الجهاز بحيث يكون مقياسا خطيا تقريبا للتيار I كما هو مبين فى الشكل .

تعتمد حساسية حركة الجلفانومتر ، أى مقدار الانحراف الناشىء عن كمية معينة من التيار ، على عدة عوامل . من أهم هذه العوامل كزازة (stiffness) زنبرك الاستعادة ، فلو كان على الجهاز أن يكون متينا وقابلا للحمل ، للزم ألا يكون الزنبرك رقيقا أكثر من اللازم . تعتمد الحساسية أيضا على عدد لفات السلك فى الملف فلو ضوعف هذا العدد لتضاعف تبعا لذلك عزم اللى المؤثر على الملف .

يعطى الجلفانومتر شديد الحساسية انحرافا ملء التدريج إذا مر به تيار يبلغ كسرا من ميكرو أمبير microampere (10^{-6}A وتختصر μA) فقط ، ومثل هذا الجلفانومتر شديد الحساسية يجب أن يحتوى على عدد كبير جدا من اللفات بالملف وتصل المقاومة فيه إلى 100 Ω وحتى فى هذه الحالة فإن فرقا للجهد مقداره 10^{-4}V عبر طرفيه كفيل بجعل تيار قدره 10^{-6}A يمر خلاله . ولذلك فهو يستخدم كمؤشر حساس بمثل ماهو أميتر أو جلفانومتر . تعطى الجلفانومترات التى تستخدم على المنضدة وهى شائعة فى معامل الطلاب ، انحرافا ملء التدريج عند مرور تيار يبلغ حوالى (10^{-3} A) 1mA وتكون مقاومتها 20 Ω تقريبا .

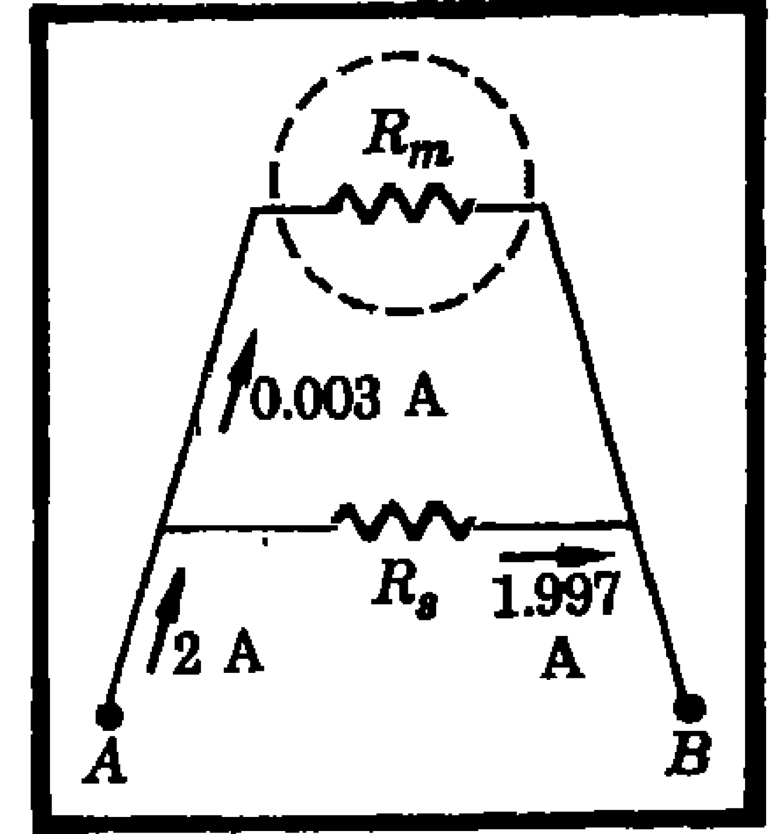
٢٠ – ٢ الأميترات

الأميتر هو حركة جلفانومتر معدلة اذا أريد له أن يكون اميترا حساسا فقد يكون جلفانومتر دون تعديل . على أن معظم التعديلات تعطى انحرافا ملء التدريج لتيارات تبلغ بضع ميللى أمبير او أقل ولذا لايمكن استخدامها مباشرة لقياس تيارات أكبر من هذا . افترض ، كمثال محدد ، اننا نريد صنع أميتر ينحرف ملء التدريج لتيار قدره 2A . والحركة المستخدمة لها مقاومة قدرها 20 Ω وتنحرف ملء التدريج لتيار قدره 3mA (أى أنها حركة 60 mV ، أى 60×10^{-3} V عبر طرفيها ستؤدى الى تيار قدره 3mA يسرى خلال الملف ليحرف الحركة ملء التدريج) .

لكى نصنع الاميتر المطلوب من هذه الحركة أو الجلفانومتر ، وجب أن نجد طريقة تسمح للتيار 2A أن يمر خلال جهاز القياس بينما لايمر سوى 0.003A خلال الحركة ، ويمكن عمل هذا اذا صمم جهاز القياس كما فى الشكل ٢٠ – ٣ ، حيث رسمت الحركة الفعلية أو الجلفانومتر كجهاز دائرى مركزى مقاومته R_m .

تركيب الاميتر

حين يمر تيار مقداره 2A فى هذا الجهاز عند النقطة A فاننا نريد 0.003A فقط أن تسرى خلال الحركة ذات المقاومة R_m ، ويعنى هذا اننا يجب أن نصنع مقاومة صغيرة على التوازى مع الحركة حتى يمكن أن يمر خلالها 1.997 A يسمى هذا المقاوم الصغير مقاومة مجزئة ويشار اليها بالرمز R_s فى الشكل ٢٠ – ٣ . ولحساب R_s نتبع الآتى :



شكل ٢٠ – ٣
يمر جزء صغير من التيار فقط خلال الحركة المتصلة بالاميتر اما معظم التيار فيمر خلال مقاومة مجزئة للتيار

تنحرف الحركة ملء التدريج عندما يكون هناك فرق للجهد مقداره 60×10^{-3} V بين طرفيها من A الى B . ولكن تحت نفس هذه الظروف يجب أن يحمل المقاوم المجزىء R_s تيارا قدره 1.997A . باستعمال قانون أوم نجد أن

$$60 \times 10^{-3} = 1.997 R_s$$

أو

$$R_s \approx 0.030\,\Omega$$

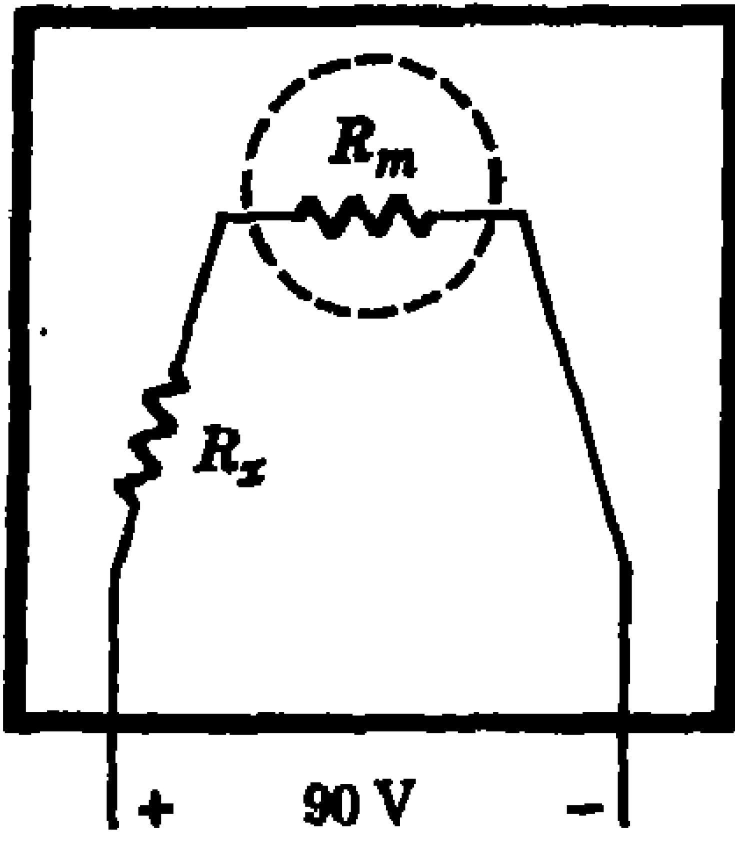
لاحظ ان المقاوم المجزىء صغير الى أقصى حد وهو دائما لايعدو كونه قطعة من سلك نحاسى . علاوة على هذا تكون مقاومة الأميتر أقل من 0.030 Ω وذلك لأن R_s متصلة على التوازى مع R_m للأميتر وهذا هو مايجب أن يحدث لاننا لانريد للأميتر أن يسبب اضطرابا فى الدائرة حين يوصل على التوالى لقياس التيار المار . (مالذى يحدث لو أن هذا الاميتر وصل بطريق الصدفة عبر فرق للجهد مقداره 1 V ؟)

كثيرا مانصادف أميترات ذات أكثر من مدى ولذا فهى تحتوى على عدة مجزئات متناوبة ، وتتحدد حساسية جهاز القياس على أساس مجزىء التيار الذى يتصل عبر طرفيه .

٢٠ – ٣ الفولتميترات

تركيب الفولتميتر

يمكننا بناء فولتميتر من الحركة التى استخدمت فى الفصل السابق لصنع أميتر . فتلك الحركة كانت تنحرف ملء التدريج لتيار قدره 0.003 A وكانت مقاومتها 20 Ω وعليه يكون فرق الجهد عبر طرفيها عند انحراف ملء التدريج هو (0.003) (20) أو 60mV . لنستخدم هذه الحركة فى تركيب فولتميتر 90V .



شكل ٢٠ – ٤
لعمل فولتميتر من حركة حساسة فإننا نضع مقاومة كبيرة بداخله .

يوضح الشكل ٢٠ – ٤ دائرة مناسبة لهذا الغرض . عندما يكون فرق الجهد بين الأطراف 90V فإننا نريد أن يمر تيار قدره 0,003A خلال جهاز القياس . لإيجاد المقاومة R_x التى يجب وضعها على التوالى مع الحركة ، نطبق قانون أوم للدائرة التى فى شكل ٢٠ – ٤ . لدينا

$$90 = (0.003)(20 + R_x)$$

وللحصول على R_x نجد

$$R_x = 29{,}980\ \Omega$$

من الواضح أن مثل هذا الجهاز له مقاومة عالية جدا . وحيث أننا نستعمل الفولتميتر بتوصيله عبر فرق الجهد فإننا نحتاج أن تكون مقاومته عالية جدا ، حتى لايحدث اى اضطراب فى الدائرة . وأفضل الفولتميترات تكون مقاومته أكبر بكثير من هذا الذى وصفناه ، فجهازنا يقال أن له مقاومة 29.980/90 او 333 Ω/V،وهذا لايعنى أن المقاومة تختلف باختلاف قراءة التدريج . ولكنها تعطى النسبة فقط بين مقاومة الجهاز وأقصى قراءة فى التدريج . إذا كان جهاز مشابه له حركة أكثر حساسية فإن مقاومته يجب أن تكون أكبر . (لماذا ؟) .

٢٠ – ٤ عزم اللى على عروة تيار

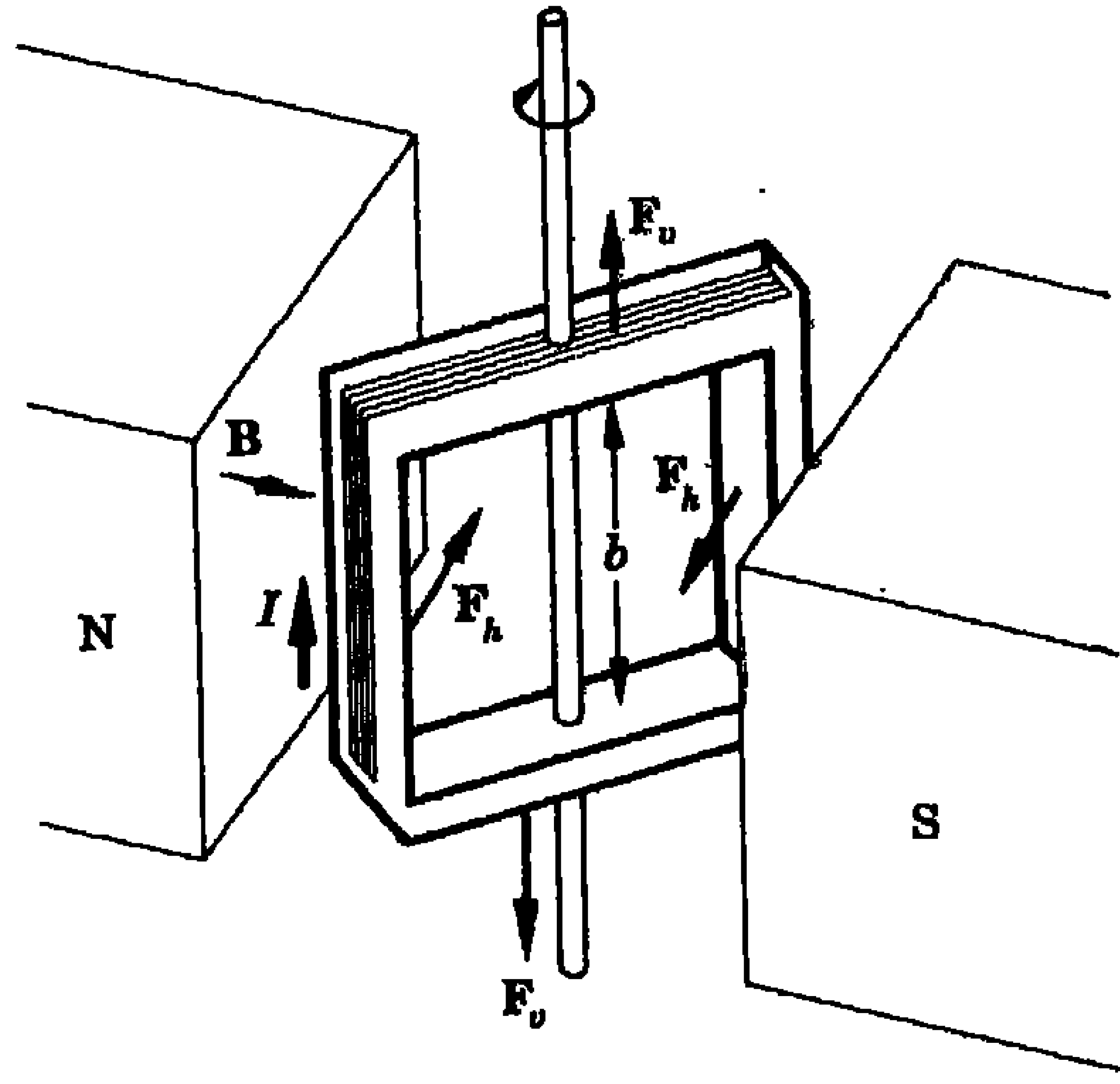
يعتمد عمل حركة جهاز للقياس على حقيقة أن الملف الحامل للتيار يتعرض لعزم لى أو دوران فى مجال مغناطيسى كما وصفنا فى القسم السابق ، ولهذه الحقيقة أهمية كبرى لأنها الأساس فى عمل كثير من الأجهزة بما فى ذلك المحركات الكهربائية ، ولهذا السبب سنقوم بفحص عزم اللى على مثل ذلك الملف بطريقة كمية .

يوضح الشكل ٢٠ – ٥أ موقفا لملف يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى ، وكما هو مبين يركب الملف على محور بحيث يمكنه الدوران . باستعمال قاعدة اليد اليمنى ، يمكننا إيجاد القوى المؤثرة على الجوانب المختلفة والموضحة فى الشكل .لاحظ أن هناك قوتين فقط F_h وهما اللتان تسببان عزما لى حول محور الدوران،بل إنه حتى هاتين القوتين لايمكنهما خلق أى عزم لى حين يكون مستوى الملف عموديا على مجال المغناطيس . يحدث أقصى عزم لى حين تمرق خطوط Bعلى سطح الملف أى حين تكون خطوط المجال واقعة فى مستوى الملف ، وذلك لأن ذراع الرافعة للقوة F_h يكون وقتئذ عند أقصى قيمة له .

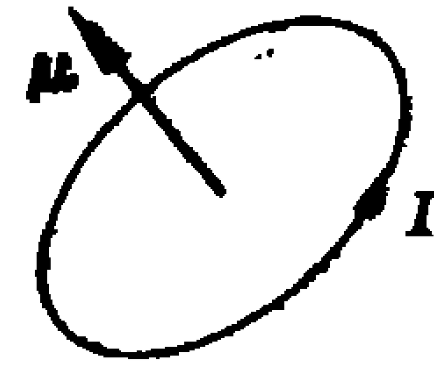
للحصول على تعبير كمى لعزم اللى على الملف نلاحظ أن كلا من القوتين F_h تعطى عزما هو

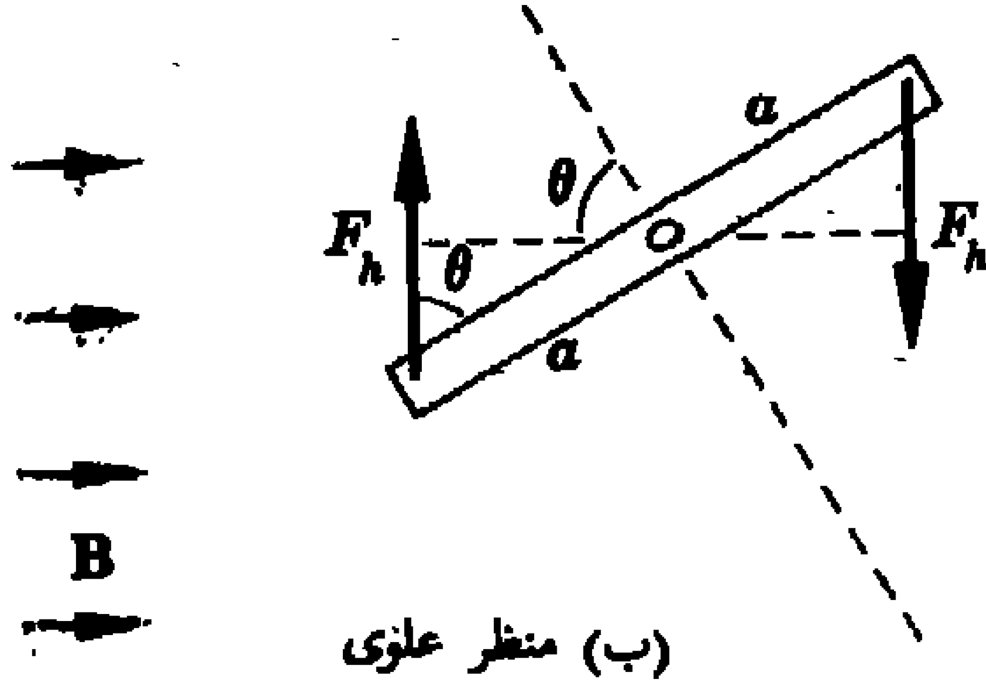
(F_h) (ذراع الرافعة)

شكل ٢٠ - ٥
يتعرض الملف فى (أ) لعزم لى ولذا فهو يكافىء قضيبا مغناطيسيا قصيرا كالذى فى (د)

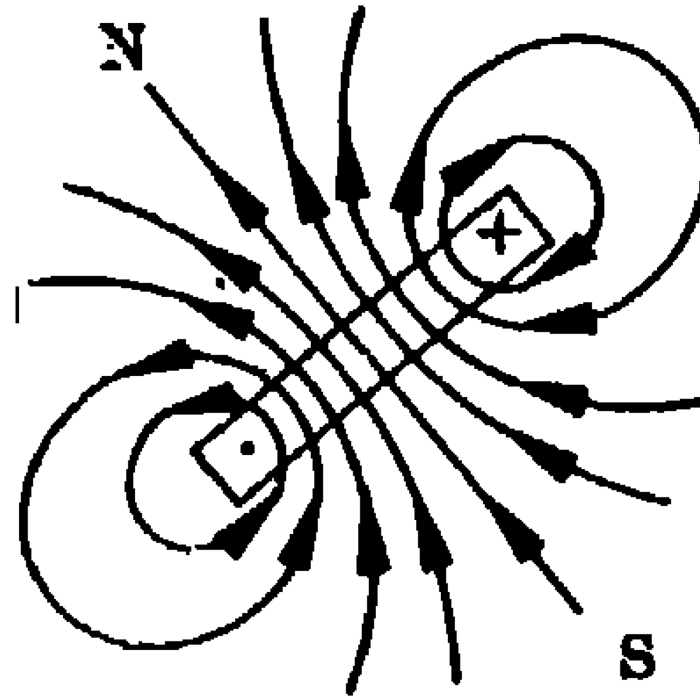


(أ) رسم منظورى

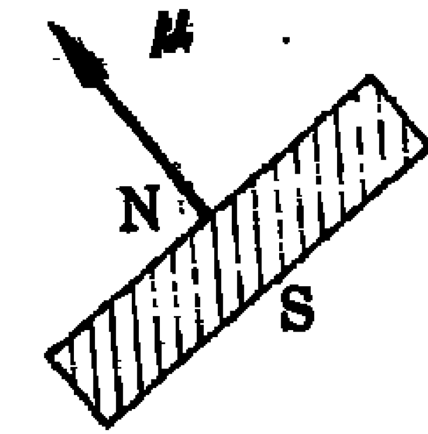




(ب) منظر علوى



(ح) مجال (ب)



(د) المغناطيس المكافىء

ومن الشكل ٢٠ - ٥ب نرى أن ذراع الرافعة هو $a.\sin\theta$ حيث θ هى الزاوية المبينة وعلى هذا يكون عزم اللى على الملف هو

$$\text{عزم اللى} = 2F_h a \sin\theta$$

ولكن F_h هى ببساطة القوة المؤثرة على الجانب الرأسى للملف ، فلو أن طول هذا الجانب كان b وكان التيار I فإن كل سلك رأسى سيساهم بقوى مقدارها BIb فى F_h ولما كان هناك N عروة بالملف فإن $F_h = NBIb$ ويكون عزم اللى هو :

عزم اللى على ملف

$$\text{عزم اللى} = (2ab)(NI)(B\sin\theta)$$

لاحظ ان المقدار $2ab$ هو ببساطة مساحة الملف ، ولذا يمكن كتابة .

(عزم اللى) = (المساحة) $(NI)(B \sin \theta)$ (٢٠ − ١)

على الرغم من أننا قد اشتققنا المعادلة (٢٠ − ١) لملف ذى شكل خاص جداً إلا أن هذه المعادلة صحيحة لجميع الملفات المسطحة (flat). حيث أن NI هو التيار المار حول الملف ، فإننا نرى أن أهم ملامح الملف (إلى جانب اتجاهه) مساحة الملف والتيار المار به ، وفى ضوء هذا يكون من المعتاد دائما ان نعرف كمية تسمى **العزم المغناطيسى** لعروة التيار :

العزم المغناطيسى

μ = العزم المغناطيسى = (المساحة) (I)

هناك فائدة محددة للتفكير فى عروة التيار على أنها قضيب مغناطيسى يتميز بعزمه المغناطيسى كما سنرى الآن .

لقد أشرنا إلى أن عروة التيار يكون لها مجال مغناطيسى يشبه ذلك الذى لقضيب مغناطيسى وقد أعدنا رسم هذا فى الشكل (٢٠ − ٥ جـ)، حيث يبدو الملف كقضيب مغناطيسى قصير وسميك وله قطبان ، شمالى وجنوبى كما هو مبين ، وهذا التشابه مشار إليه مرة ثانية فى الشكل ٢٠ − ٥د . علاوة على ذلك إذا رجعنا الى الشكلين (أ) ، (ب) فإننا نرى أن الملف نفسه يتعرض لعزم لى يشبه ذلك المؤثر على القضيب المغناطيسى المكافىء له . فى الجزء (أ) ، مثلا ، سيتصرف الملف كما لو كان قضيبا مغناطيسيا ، قطبه الشمالى عند الجانب الأقصى للملف ، وحيث أن هذا الجانب قريب من القطب الشمالى للمغناطيس الذى ينشىء المجال الخارجى ، لذا فان الملف يدور فى الاتجاه المبين هنالك .

للإفادة الكاملة من هذا التشابه فاننا نعطى العزم المغناطيسى μ اتجاها ونجعل منه متجها كما هو مبين فى الشكل ٢٠ − ٥د . يكون اتجاه μ عموديا على مساحة العروة ويتحدد حسب قاعدة اليد اليمنى ، بمعنى أن الأصابع تلتف فى اتجاه التيار I ، أما الإبهام فيشير على طول μ نتيجة لهذا يشير متجه العزم المغناطيسى μ بحيث يكون خارجا من القطب الشمالى للمغناطيس المكافىء ويستتبع هذا النتيجة الهامة التالية :

عندما توضع عروة تيار فى مجال مغناطيسى ، فانها تدور بحيث ينطبق متجه العزم المغناطيسى لها مع متجه المجال المغناطيسى .

ويمكننا أن نقدر صحة هذه النتيجة حين تذكر أن إبرة البوصلة هى ببساطة قضيب مغناطيسى وأن اتجاه المجال يعرف بأنه ذلك الاتجاه الذى تتخذه الإبرة. وستجد من المناسب − من وقت لآخر − أن نفكر فى عروة التيار على أنها مغناطيس له عزم مغناطيسى μ .

يشكل عزم اللى على عروة التيار أهمية خاصة بالنسبة للمحركات الكهربائية ، ولكن قبل أن نناقش عمل المحركات من المهم أن نفهم المبدأ الذى يقوم على أساسه المولد . سنرى أن المبدأ نفسه قائم فى حالة المحركات ويؤثر على سلوكها الكهربائى ، كما سنرى فى القسم الثانى كيف أن المولد الكهربائى يقوم بإنتاج فرق للجهد .

مثال توضيحي ٢٠ - ١ افترض نيلز بوهر فى عام ١٩١٣ الصورة المعقولة والناجحة التالية لذرة الأيدروجين . عند مركز الذرة يوجد بروتون شحنته 1.6×10^{-19} + وكتلته 1.67×10^{-27} . يبلغ قطر البروتون حوالى 10^{-15}m .يدور الكترون حول البروتون وعلى مسافة 0.53×10^{-10}m كنصف قطر للمدار . تبلغ شحنة الالكترون -1.6×10^{-19}C وكتلته $1/1840$ من كتلة البروتون . استنتج بوهر أن الالكترون يدور حول النواة 6.6×10^{15} مرة فى الثانية الواحدة . وهذه الحركة الدائرية للالكترون المشحون تكافىء تيارا يمر فى عروة من السلك اوجد العزم المغناطيسى لذرة الأيدروجين والناشيء عن الحركة المدارية لالكترونها .

طريقة الحل : العزم المغناطيسى μ حسب التعريف - هو IA حيث A مساحة العروة ؛ وهى

$$A = \pi r^2 = (\pi)(0.53 \times 10^{-10})^2 \text{ m}^2 = 0.88 \times 10^{-20} \text{ m}^2$$

لايجاد I نعلم أن التيار فى عروة يساوى الشحنة المارة عبر نقطة ما فى الثانية ، وبالنسبة للحالة الراهنة يدور الإلكترون حول الذرة 6.6×10^{15} مرة فى الثانية وهو يحمل شحنة مقدارها 1.6×10^{-19} C ماراً بنقطة معينة ذلك العدد من المرات فى الثانية الواحدة ؛ ومن ثم ،

$$I = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(6.6 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) = 1.05 \times 10^{-3} \text{ A}$$

وعلى هذا تقوم الذرة بعمل مغناطيس صغير ذى عزم مغناطيسى ،

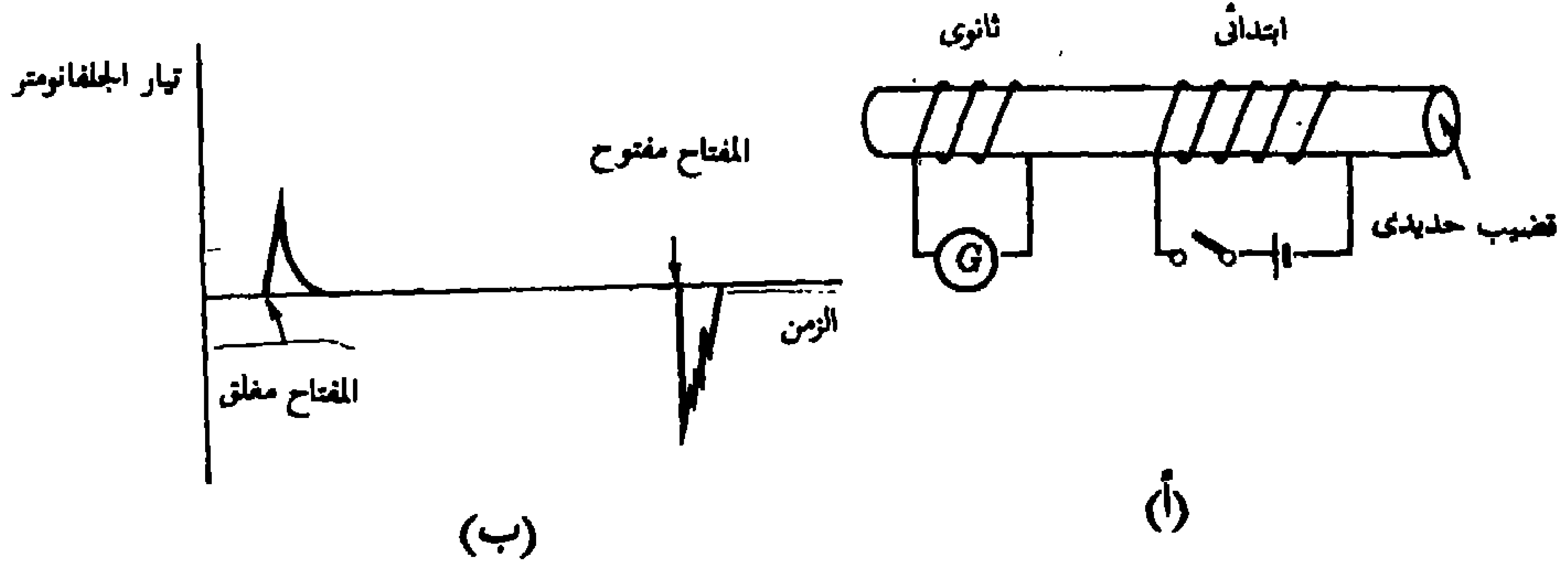
$$\mu = IA = 9.3 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

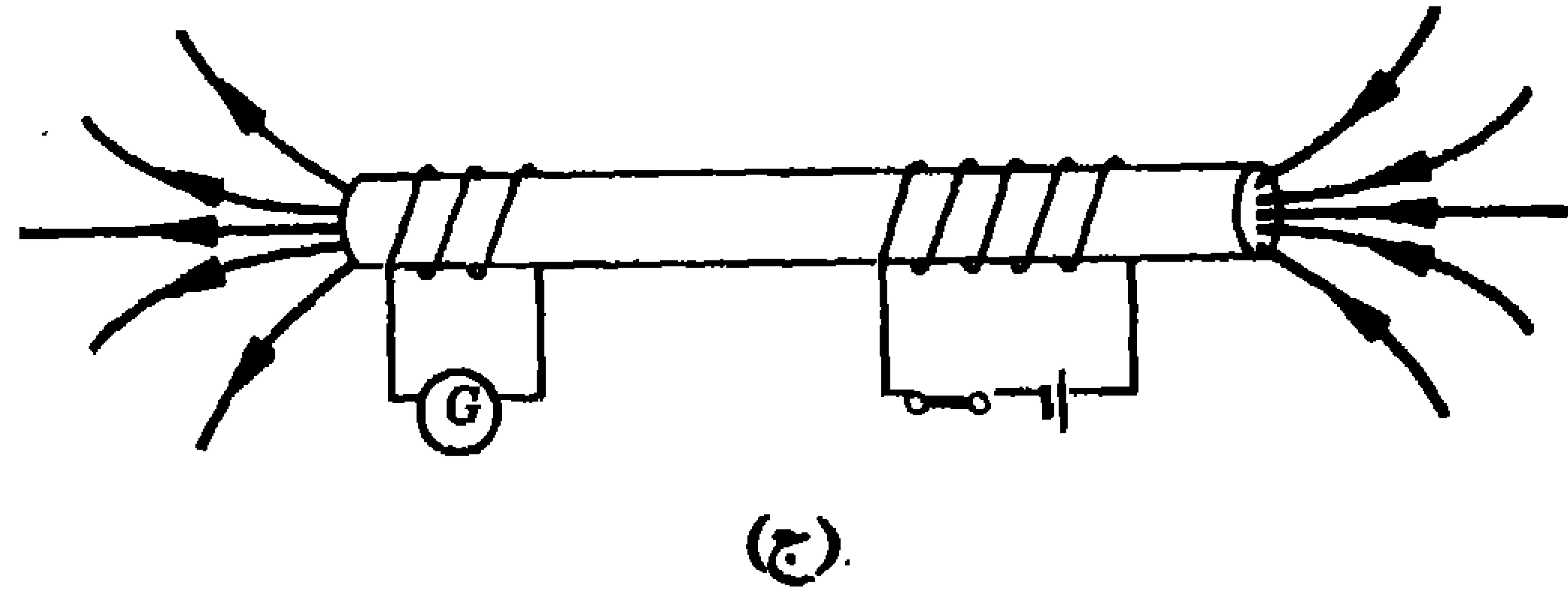
حين أصبحت الأساليب التقنية متاحة لإجراء قياسات للعزم المغناطيسى للذرة فإن هذه القيمة المتوقعة قد تأكدت تماما . على أنه بالإضافة إلى هذا كان الإلكترون نفسه يتصرف كمغناطيس صغير وصور هذا كنتيجة للحركة التدويمية للإلكترون المشحون حول محور يمر خلال مركز الالكترون .

٢٠ - ٥ ق . د . ك . المنتجة بالحث

شكل ٢٠ - ٦
يوجد تيار مستحث فى الملف الثانوى عندما يتغير التيار فى الملف الابتدائى فقط وتكون نبضات التيار فى الواقع أضيق بكثير عما هو مرسوم فى (ب) .

هناك تجربة أساسية وبسيطة يمكن إجراؤها باستخدام الجهاز المبين فى شكل ٢٠ - ٦أ . فهناك دائرتا توال بسيطتان : تتكون الأولى من بطارية ومفتاح على التوالى مع سلك طويل ثم لفة حول قضيب حديدى كما هو مبين ، سنسمى هذا الملف **ملفاً ابتدائيا** لأنه متصل بالبطارية . هناك أيضا سلك مستقل ملفوف حول القضيب . يتصل هذا الملف بجلفانومتر ولاتوجد فى دائرته أية بطارية ، ويسمى **الملف الثانوى** .



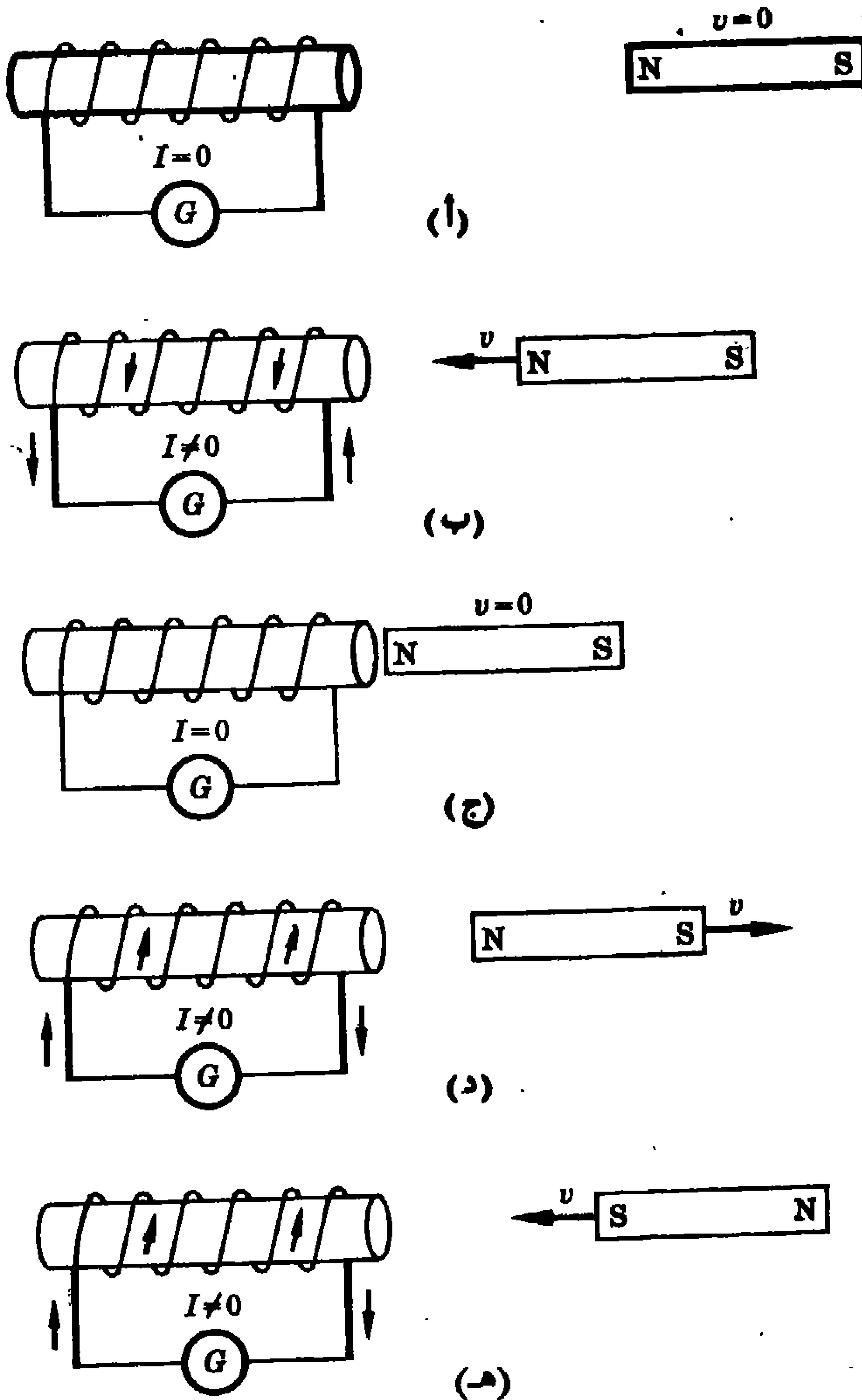


(ج)

حيث أن دائرة الملف الثانوى لاتحتوى على بطارية ، فقد يخمن الإنسان أن التيار المار بها سيكون دائما صفرا ، ولكن تبرز حقيقة مذهلة عند إغلاق المفتاح أو فتحه فى الدائرة الابتدائية بشكل فجائى ، وفى نفس هذه اللحظة ينحرف الجلفانومتر فجأة ثم يعود إلى الصفر أى أن تياراً يسرى فى دائرة الملف الثانوى للحظة قصيرة ويبدو كما لو كانت الدائرة الثانوية قد امتلكت بطارية ، أو مصدر ق . د . ك ، للحظة قصيرة لذا نقول أن ق . د . ك **منتجة بالحث** قد وجدت فى الملف الثانوى .

يبين الشكل ٢٠ - ٦ ب سمة أخرى لهذا التيار المستحث وكذا ق . د . ك . فكما نرى هناك يسرى التيار ، قصير العمر فى اتجاه معين حين يضغط المفتاح ليغلق ، ولكن ق . د . ك تجعل نبضة التيار تسرى فى الاتجاه المضاد حين يجذب المفتاح ليفتح . يدل هذا على أن اتجاه ق . د . ك المنتجة بالحث يعتمد على ماإذا كان التيار فى الملف الابتدائى متزايدا أو متناقصا .

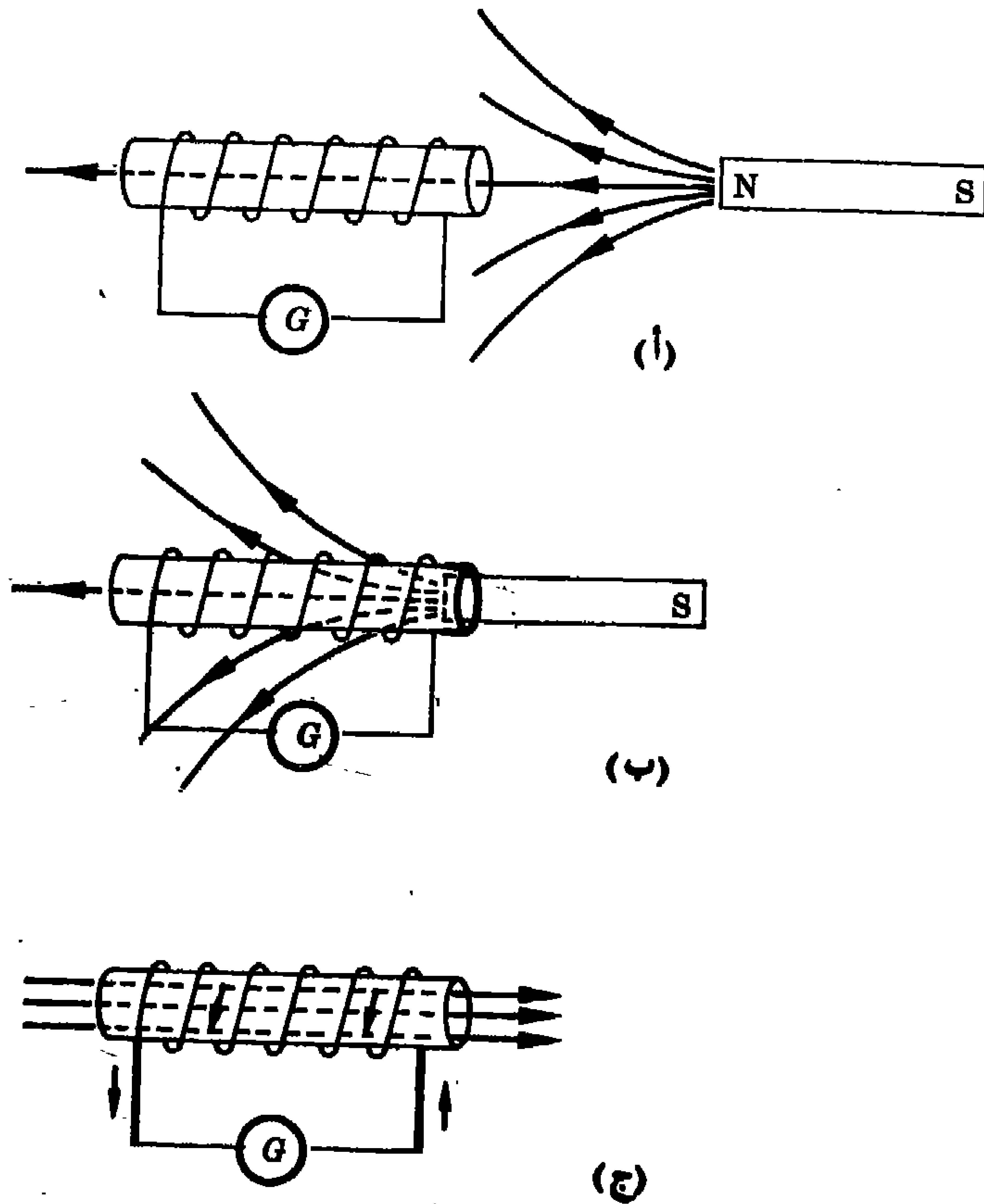
هناك تجربة ثانية مشابهة موضحة فى الشكل ٢٠ – ٧ تتضمن هذه التجربة قضيبا مغناطيسيا وملفا متصلا على التوالى مع جلفانومتر . حين يكون المغناطيس ساكنا بجوار الملف ، كما فى الجزءين (أ) ، (حـ) من الشكل فلا يسرى تيار فى الملف ، ولكن إذا حرك المغناطيس بالنسبة للملف فإن التيار يسرى فى الملف كما تبين الأجزاء ب ، د ، هـ . كما نرى ، توجد ق . د . ك منتجة بالحث فى الملف حين يكون المغناطيس والملف فى حركة نسبية فقط ، وتختفى ق . د . ك المنتجة بالحث حين تتوقف الظروف عن التغير .



شكل ٢٠ – ٧
يظهر التيار المستحث فى الملف عندما يكون التدفق متغيرا فقط . لماذا يسرى التيار فى الاتجاه المبين ؟

لقد اكتشف مايكل فارادای (۱۷۹۱ – ۱۸٦۷) هذه الحقائق وقام بدراستها ، وقد استنتج أن الـ . ق . د . ك المنتجة بالحث تتواجد بالملف فقط عندما يكون التدفق خلال الملف متغيرا كما فى الشكل ۲۰ – ٦ حـ على سبيل المثال . حيث أن خطوط المجال تتبع القضيب الحديدى كما هو مبين لذا يمر تدفق كبير خلال الملف الثانوى حين يكون المفتاح مغلقا ، وحين يفتح المفتاح يتضاءل هذا التدفق حتى يصل إلى الصفر . تتواجد ق . د . ك منتجه بالحث أثناء الوقت الذى يحدث فيه تغير فى التدفق ولاتوجد أية ق . د . ك حين لايكون التدفق فى حالة متغيرة .

إذا رجعنا إلى الشكل ۲۰ – ۸ فإننا نرى أن نفس الموقف موجود بالنسبة للملف والمغناطيس . فكما هو مبين هناك ، يتغير التدفق خلال الملف حين يتحرك المغناطيس إن قربا أو بعدا . تتواجد ق . د . ك منتجة بالحث خلال الوقت الذى يكون فيه التدفق خلال الملف متغيرا . ولنبحث الآن هذا التأثير بشكل كمى .



شكل ۲۰ – ۸
حين يتحرك المغناطيس من (أ) الى (ب) فإن التيار يسرى فى الملف فى الاتجاه المبين فى حـ . لماذا ؟

يمكننا معرفة اتجاه الـ ق . د . ك المنتجة بالحث وذلك بالرجوع إلى النتائج التجريبية فى الأشكال ٢٠ – ٦ إلى ٢٠ – ٨ ، فالرجوع إلى شكل ٢٠ – ٨ مثلا ، يمكننا أن نتعلم كيفية التنبؤ باتجاه ق . د . ك . كما نرى فى الجزء (أ) والجزء (ب) يتغير التدفق بطريقة معينة بحيث يزداد التدفق خلال الملف فى اتجاه اليسار ، ولكن – كما هو مبين فى الجزء (حـ) ، يسبب التيار المستحث فى الملف تدفقا فى الاتجاه المضاد لهذا . ويكون اتجاه ق . د . ك المنتجه بالحث بحيث تؤدى إلى ظهور تيار يكون التدفق الناشىء عنه ميالا الى الغاء التغير فى التدفق خلال الملف . ستلاحظ عند فحص الشكلين ٢٠ – ٦ ، ٢٠ – ٧ سلوكا مشابها . يكون اتجاه التيار المستحث بحيث يحاول أن يلغى تغير التدفق خلال الملف ، وقد تضمنت هذه القاعدة فى **قانون لنز** الذى يمكن أن ينص كالاتى :

قانون لنز

يقوم تغير التدفق خلال عروة من السلك بحث ق . د . ك . فى العروة ويكون اتجاه التيار الناشىء عن هذه الـ ق . د . ك المنتجة بالحث بحيث ان التدفق الذى يحدثه التيار يعمل على معادلة التغير الأصلى فى التدفق خلال العروة* .

بطريقة اخرى ، لو أن التدفق خلال ملف كان متجها إلى اليسار وكان متزايد فإن الـ ق . د . ك . المنتجة بالحث سيكون اتجاهها بحيث تنتج تدفقا خلال الملف يكون متجها إلى اليمين. ولو كان التدفق متجها إلى اليسار وكان متناقصا ، فإن ق . د . ك المنتجة بالحث ستحاول أن تنشىء تدفقا خلال الملف يتجه إلى اليسار . **تتواجد ق . د . ك المنتجة بالحث أثناء تغير التدفق فقط .**

اكتشف فارادای العلاقة الرياضية التى تحكم ق . د . ك المنتجة بالحث فى الملف . إذا كان بالملف N عروة من السلك ، ولو تغير التدفق بكمية مقدارها $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ فى زمن قدره Δt ، فإن متوسط ق . د . ك المنتجة بالحث خلال هذا الزمن يكون

قانون فارادى

$$\text{ق . د . ك} = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \qquad (٢٠ - ٢)$$

تسمى هذه المعادلة **قانون فارادای** . ليست الإشارة السالبة إلا إجراء شكليا وتذكرنا بأن ق . د . ك المنتجة بالحث تتجه بحيث تعاكس التغير فى التدفق .

مثال توضيحى ٢٠ – ٢ يحتوى ملف لولبى على 100 لفة من السلك ، وكانت مساحة مقطعة $4.0\ cm^2$ لو أن مغناطيسيا قرب بشكل مفاجىء من الملف فإن B

* يعتبر هذا نتيجة لحفظ الطاقة ، فلو أن التدفق المتولد بالتيار المستحث كان فى اتجاه يتيح تراكم التغير فى التدفق ، فإن التيار المستحث سيستمر فى حث متزايد من التيار بلا نهاية .

تتزايد من الصفر حتى 0.50 T فى زمن 0.02s فكم تبلغ القيمة المتوسطة لـ ق . د . ك المتولدة فى الملف اللولبى ؟

طريقة الحل : نذكر أن $\phi = B_{\perp}A$ وعليه فإن

$$\phi_1 = 0 \quad \text{و} \quad \phi_2 = (0.5)(4 \times 10^{-4}) = 2 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$$

وعندئذ يكون لدينا

$$\Delta\phi = 2 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$$

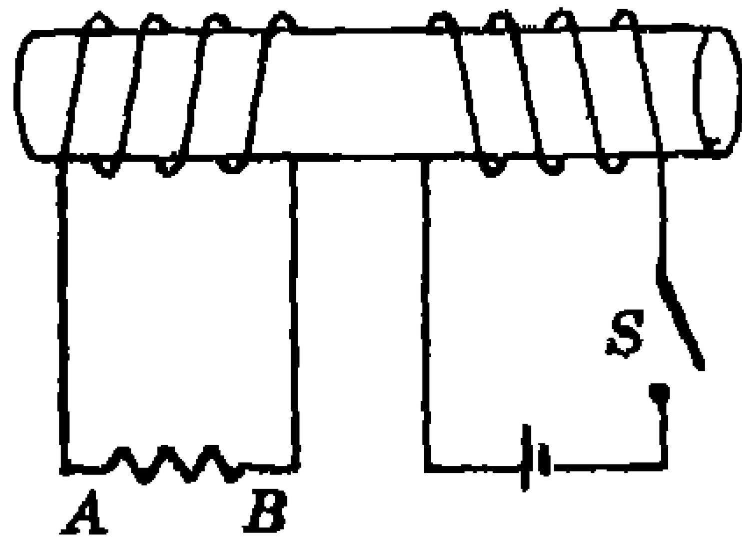
ويؤدى قانون فاراداى إلى :

$$\text{ق . د . ك} = (100)\left(\frac{2 \times 10^{-4}\ \text{Wb}}{2 \times 10^{-2}\ \text{s}}\right) = 1.0\ \text{V}$$

يجب أن تكـــون قادرا على إثبات أنه لما كان Weber يساوى newton-meter/ampere فإن وحدات الاجابة يجب أن تكون volts .

٢٠ – ٦ المحاثة المتبادلة

ينطبق قانون فاراداى للقوى الدافعة الكهربية المنتجة بالحث فى ملف على أية طريقة يتم فيها تغير التدفق خلال الملف . افترض أن لدينا ملفين موضوعين جنبا لجنب كما فى الشكل ٢٠ – ٩.حين يفتح المفتاح S ، يكون التدفق صفرا خلال أى من الملفين . لقد سبق وأن سمينا الملف الموجود فى دائرة البطارية ابتدائياً والملف الآخر ثانويا .



شكل ٢٠ – ٩
لماذا يمر التيار من A إلى B خلال المقاوم فى نفس اللحظة التى يفتح فيها المفتاح ؟

إذا أغلق المفتاح فجائيا ، فإن الملف الابتدائى سيتصرف كمغناطيس كهربائى ويولد بهذا تدفقا فى المنطقة المتاخمة . يتغلغل بعض التدفق من الملف الابتدائى خلال الملف الثانوى ، وعلى ذلك يتغير التدفق خلال الملف الثانوى اذا أغلق S فجأة . وحسب قانون فاراداى تتولد ق . د . ك منتجة بالحث فى الملف الثانوى فى نفس اللحظة التى يرتفع فيها التيار من الصفر حتى قيمته النهائية فى الملف الابتدائى . عليك أن تثبت أن اتجاه التيار المستحث خلال المقاوم فى شكل ٢٠ – ٩ سيتجه من B إلى A حينما يغلق S ويمر فى الاتجاه المضاد حين يفتح المفتاح .

تعتمد قيمة ق . د . ك المنتجة بالحث فى الثانوى على عوامل هندسية متعددة ومن بينها عدد لفات السلك على كل من الملفين ، ومدى تقارب الملفين ومساحة مقطعيهما وخلافه . (لماذا ؟) . علاوة على ذلك ، حيث أن التدفق خلال الثانوى سيكون متناسبا مع التيار فى الابتدائى ؛ فإن ق . د . ك المنتجة بالحث فى الثانوى

ستتناسب مع معدل تغير التيار فى الابتدائى ، $\Delta I_p/\Delta t$ ولهذا نكتب المعادلة التالية ، المعبرة عن ق . د . ك المنتجة بالحث فى الثانوى .

المحاثة المتبادلة

$$\text{emf}_{sec} = -M\frac{\Delta I_p}{\Delta t} \qquad ٢٠ - ٣$$

سبق أن أشرنا إلى أن ثابت التناسب M يتضمن تأثيرات هندسة الملفين . وهذا الثابت يسمى المحاثة المتبادلة للملفين . إذا كانت ق . د . ك معبر عنها بوحدات volts والتيار amperes والزمن s. فإن وحدات M تكون حسب التعريف V.s/A أو henry (H) وقد سميت هذه الوحدة باسم أحد معاصرى فاراداى وهو جوزيف هنرى (١٧٩٧ — ١٨٧٨) الذى اكتشف ، فعليا كثيرا من النتائج التى نسبت إلى فاراداى ولكن لسوء الحظ فإن نتائج هنرى التى حصل عليها أثناء وجوده فى مدينة ألبانى N.Y لم تنشر على نطاق واسع ولذا كان لها تأثير طفيف على التقدم العلمى فى ذلك الوقت .

مثال توضيحى ٢٠ — ٣ ملفان من السلك الملفوف حول قلب حديدى ، لهما محاثة متبادلة مقدارها 0.50 H ، ما هى القيمة المتوسطة لـ ق . د . ك التى تتولد فى الثانوى عندما يزيد تيار الابتدائى من 2.0A إلى 3.0A فى $\frac{1}{100}$ s ؟

طريقة الحل : نريد أن نشير أولا إلى أنه عندما يلف ملفان حول قلب حديدى فإن التدفق يكون أكبر بكثير مما لو كانا قد لفا حول قلب غير مغناطيسى ، ومن ثم فقيمة M المعطاه هنا أكبر بكثير عما يمكن أن يوجد للملفات ذات القلب غير الحديدى .

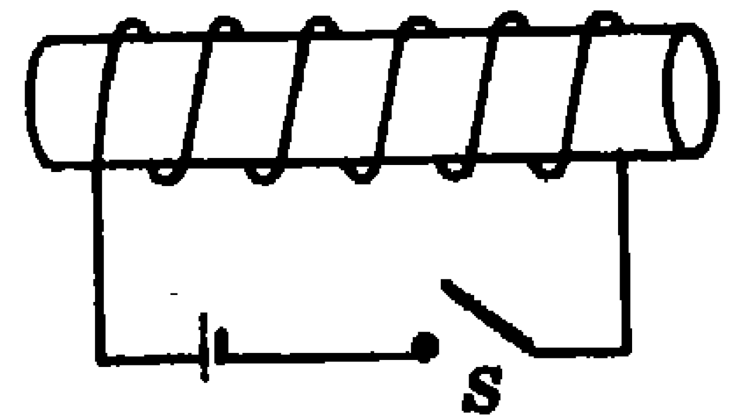
باستخدام المعادلة (٢٠ — ٣) فإننا نجد ، باستخدام وحدات SI المناسبة ،

$$\text{emf} = (0.50)\left(\frac{1.0}{0.01}\right) = 50 \text{ V}$$

لاحظ أن ق . د . ك هذه ستتواجد خلال لحظة فقط فى الثانوى ، وبمجرد أن يصبح التيار فى الابتدائى ثابتا فإن التدفق يتوقف عن التغير ولا يصبح هناك أى ق . د . ك منتجة بالحث .

٢٠ — ٧ المحاثة الذاتية

شكل ٢٠ — ١٠
حين يغلق المفتاح أولا فإن الملف سيقوم بحث ق . د . ك داخل نفسه . هل ستكون هذه الـ ق . د . ك مساعدة أو معاكسه للبطارية ؟



لو أننا صدقنا قانون فاراداى ، فإننا بذلك نعلم أن أى تغير فى التدفق خلال ملف ما سيحث ق . د . ك فى ذلك الملف . ويعنى هذا أنه عندما يتغير تيار خلال ملف ما فإن هذا الملف يحث ق . د . ك داخل نفسه ، وعلى هذا لو اعتبرنا الملف المرسوم فى الشكل ٢٠ — ١٠ فان التدفق يتغير فيه من الصفر وحتى قيمة محدودة حينما يقفل المفتاح أول مرة . سيتولد تدفق نتيجة للتيار وسيتجه هذا

التدفق نحو اليسار خلال الملف . ستتولد حسب قانون فاراداى ق . د . ك منتجة بالحث فى الملف وستحاول أن تنتج تدفقا متجها إلى اليمين خلال الملف . أى أن ق . د . ك المنتجة بالحث يجب أن تكون معاكسة لتلك الناشئة عن وجود البطارية. لو أن المفتاح فتح فجأة ، فإن ق . د . ك المنتجة بالحث ستكون فى مساعدة – بدلا عن معاكسة – البطارية (هل يمكنك توضيح ذلك ؟) .

هنا أيضا ستتحكم هندسة الملف ومادة القلب فى تحديد قيمة ق . د . ك المنتجة بالحث – لو كان $\Delta I/\Delta t$ هو معدل تغير التيار خلال الملف ، فاننا نستطيع كتابة المعادلة التالية لقيمة ق . د . ك المتوسطة والمنتجة بالحث .

$$\text{emf} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (٢٠ - ٤)$$

المحاثة الذاتية

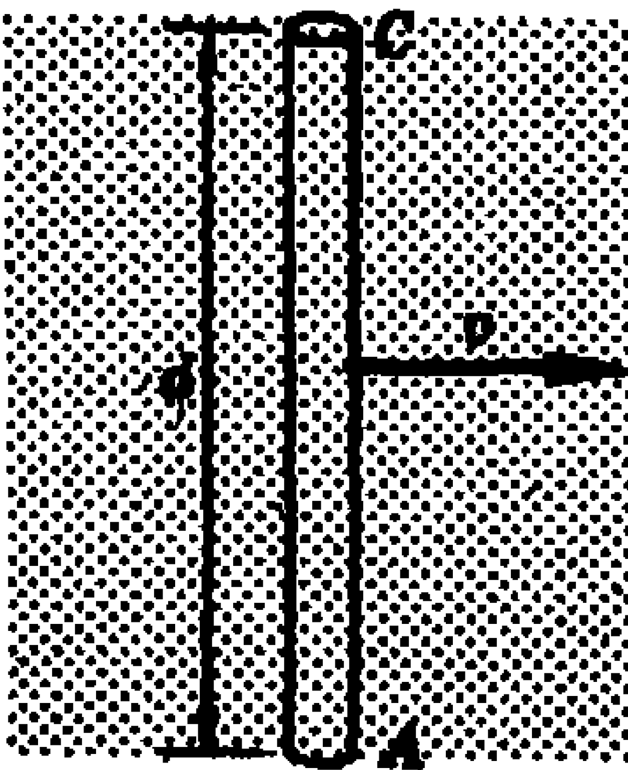
يسمى ثابت التناسب L **المحاثة الذاتية** للملف . وله نفس وحدات المحاثة المتبادلة أى هنرى henry .

من الواضح ، أنه إذا كان الملف ملفوفا حول قلب حديدى ، فإن التدفق خلاله سيكون أكبر بكثير مما لو كان هناك مادة غير مغناطيسية ،ومن ثم ، إذا كنا نريد محاثة ذاتية كبيرة فإن ملف المحاثة يجب أن يكون ملفوفا حول قلب حديدى سنعود إلى سلوك المحاثة الذاتية والمتبادلة فى أقسام تالية حيث تظهر أهمية هذه الكميات فى دوائر التيار المتردد (ac) ، حيث يتغير التيار وبالتالى التدفق بشكل مستمر .

٢٠ – ٨ ق . د . ك الحركية

يمكن بسهولة – فى بعض الحالات على الأقل – تفسير حث ق . د . ك فى دائرة عن طريق تغيير التدفق وذلك بطريقة أخرى . وتؤدى هذه الطريقة الثانية للمعالجة إلى مزيد من الفهم للعمليات التى تحدث . وأساس هذه الطريقة هو حقيقة أن الشحنة المتحركة تتعرض لقوة حين توجد فى مجال مغناطيسى ، وقد تعلمنا أن القوة F المؤثرة على شحنة q متحركة بسرعة v عمودية على مجال مغناطيسى $B_\perp$ تعطى بالمعادلة :

$$F = B_\perp qv \qquad (٢٠ - ٥)$$



شكل ٢٠ – ١١ تتعرض الالكترونات فى السلك لقوة تتجه إلى قمة السلك عندما يتحرك السلك خلال المجال كما هو مبين .

باعتبار هذه الحقيقة ، لنتأمل حركة سلك طوله d فى مجال مغناطيسى كما هو مبين فى الشكل ٢٠ – ١١ . نذكر أن v فى اتجاه حركة الشحنة وأن حركة هذه الشحنات هى فى الحقيقة تيار فإن الشحنات الموجبة ستضطر أن تتجه إلى الطرف الأسفل للسلك ، ومن ثم يصير قاع السلك موجب الشحنة بينما تصبح قمته سالبة الشحنة . سيظهر مجال كهربى E بداخل السلك .

إن E عرفت على أنها قوة لوحدة الشحنات أو F/q . عند الاتزان تكون قوة المجال الكهربائى المتجهة من قاع السلك إلى قمته بحيث توازن القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنات الموجبة والتى تتجه من القمة إلى القاع . باستخدام المعادلة ٢٠ — ٥ نجد أن القوة المغناطيسية المؤثرة على وحدة الشحنات هى

$$\frac{F}{q} = B_{\perp}v$$

بينما القوة الكهربائية لوحدة الشحنات هى :

$$\frac{F}{q} = E$$

بمساواة هاتين المعادلتين نجد أن

$$E = B_{\perp}v \qquad (٢٠ - ٦)$$

وبهذا نجد أن سلكا متحركا بسرعة ثابتة مقدارها v عمودية على مجال مغناطيسى $B_{\perp}$ يقوم بإنشاء مجال كهربى بداخله وهذا المجال يعطى بالمعادلة (٢٠ — ٦) وينتج عنه فرق للجهد بين طرفى السلك . بما أن فرق الجهد هو ببساطة الشغل المبذول فى حمل وحدة الشحنات من C إلى A فإنه يصبح لدينا ،

ق . د . ك المستحثة بالحركة

ق . د . ك المنتجة بالحث = $V = Ed = B_{\perp}vd$ $\qquad$ (٢٠ — ٧)

من الممكن اشتقاق المعادلة (٢٠ — ٧) من قانون فارادای أيضاً.ولعمل هذا يجب أن تكون لدينا دائرة يمكن بالنسبة لها كتابة المعادلة الآتية :

ق . د . ك المنتجة بالحث = $N\dfrac{\Delta\phi}{\Delta t}$

لنفرض أن السلك المتحرك فى شكل ٢٠ — ١١ يتصل بواسطة ملامس منزلق مع دائرة ساكنة كما فى الشكل ٢٠ — ١٢ . يتحرك السلك مسافة قدرها v فى زمن 1s حتى يصل للوضع MN . نتيجة لهذا تزيد مساحة عروة التيار بمقدار vd وهى المساحة المظلله فى الشكل . نتيجة لهذا يكون التغير فى التدفق خلال الدائرة ، وفى زمن قدره Δt هو .

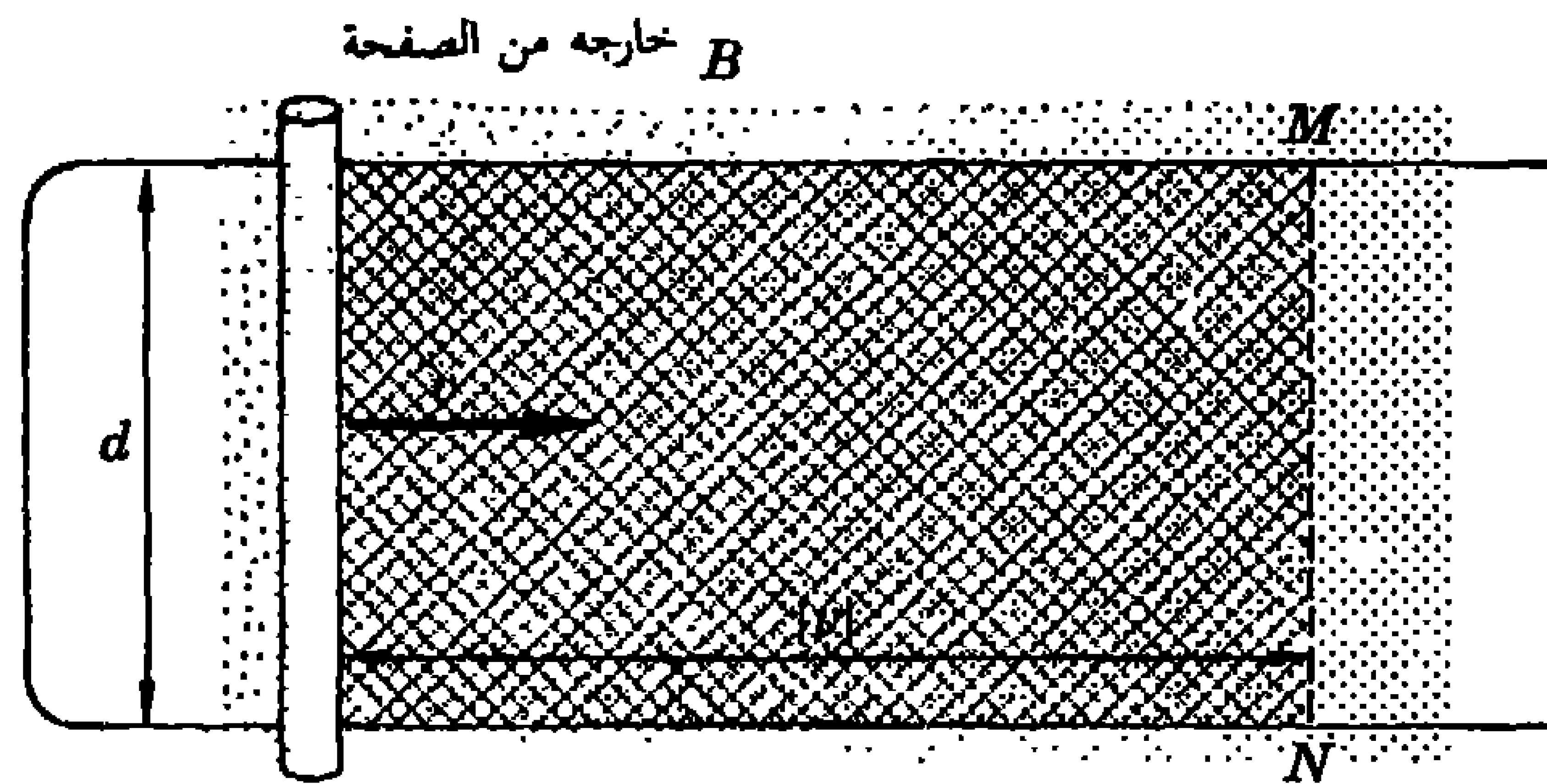
$$\Delta\phi = B_{\perp}\Delta A = B_{\perp}v\Delta t\, d$$

باستخدام قانون فارادای للقوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث فى العروة نجد أن

شكل ٢٠ - ١٢
يمكن اعتبار ق . د . ك المنتجه بالحث فى السلك على أنها نتيجة لتغير التدفق خلال العروة .

ق . د . ك . المنتجه بالحث $= \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B_{\perp}vd$

وهذه هى بالضبط المعادلة (٢٠ - ٧) . من هنا يتضح أن الـ ق . د . ك المنتجة بالحث والمعطاة بقانون فاراداى هى بالفعل مستحثه بالكامل فى السلك المتحرك المستقيم من الدائرة ، ومن ثم يكون أصل ق . د . ك المنتجة بالحث قد فهم تماما بدلالة القوى المؤثرة على شحنات تتحرك خلال مجال مغناطيسى . ولسوء الحظ ليست جميع المواقف بهذه البساطة وماعلينا إلا أن نعتبر حالة ملفى المحاثة المتبادلة من شكـل ٢٠ - ٩ لكى ندرك أن المبادىء التى تحدثنا عنها ليست دائما واضحة .



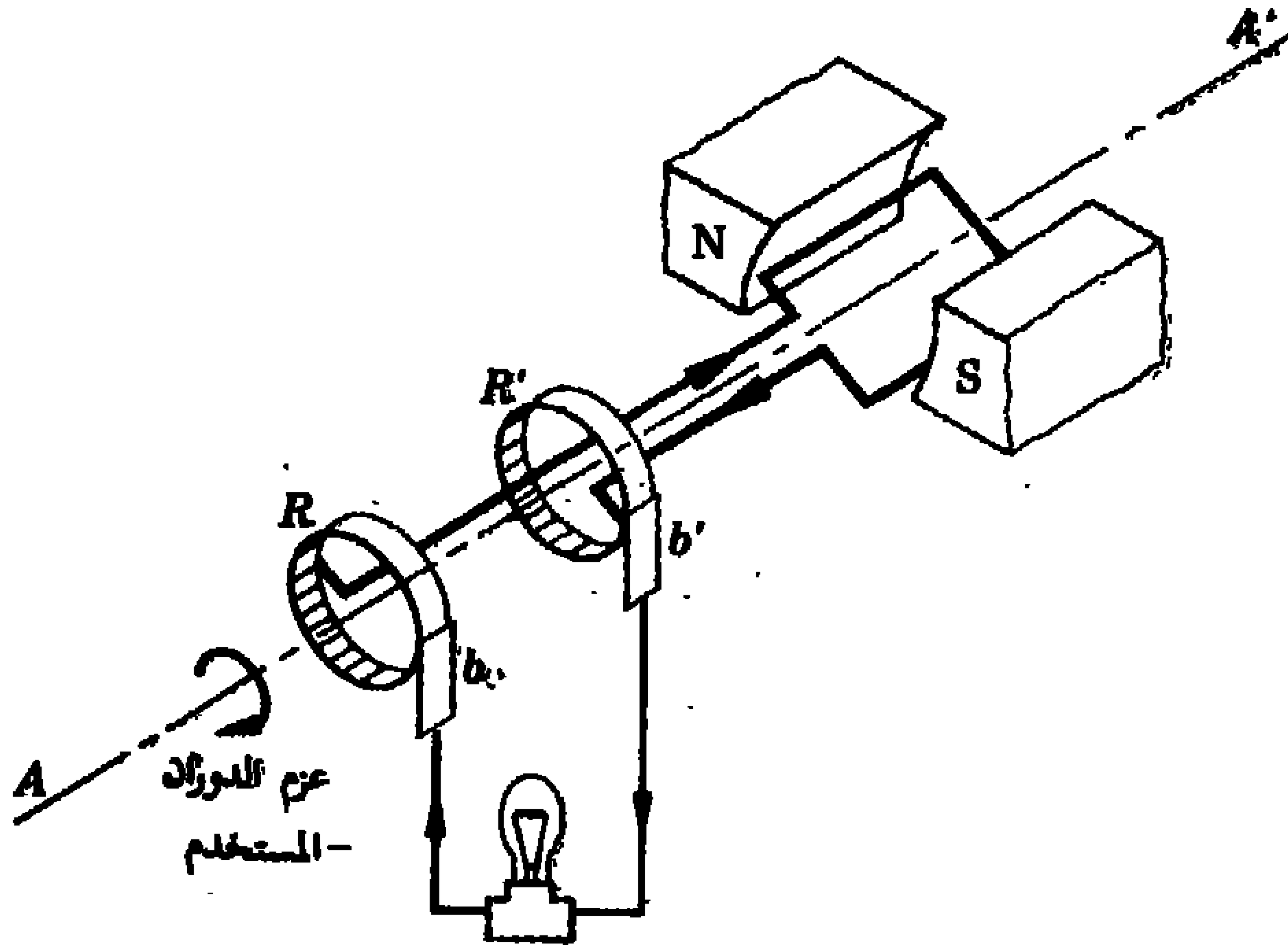
عليك أن تعرف كيف يمكن تعديل المعادلة (٢٠ - ٧) فى حالة ماإذا كانت السرعة v ليست عمودية على السلك . وربما كان من الأسهل عمل هذا بالرجوع إلى شكل ٢٠ - ١٢ . هل يمكنك إثبات أن d يجب أن يحل محلها مركبة d العمودية على v فى هذه الحالة ؟

٢٠ - ٩ مولد التيار المتردد

يقوم المولد بإنتاج فرق للجهد بين طرفين عن طريق تغيير التدفق خلال ملف . ويمكن تغيير التدفق ، نظريا ، إما بتحريك مغناطيس بالنسبة للملف واما بتحريك الملف بالنسبة للمغناطيس والاختيار الثانى أسهل فى التحقيق عمليا وهو الذى يستخدم عادة .

يدور ملف السلك المبين فى شكل ٢٠ - ١٣ حول المحور AA' . هناك مجال مغناطيسى منتظم ومتعامد مع AA' يسببه قطب مغناطيسى كما هو مبين . لاحظ أن أحد أطراف الملف متصل بحلقة انزلاق R والآخر متصل بالحلقة R' . تدور هاتان الحلقتان مع الملف ويظل هناك تلامس مع الأطراف الثابتة بواسطة فرجونين b، b' اللذين ينزلقان على الحلقتين من الخارج .

شكل ٢٠ – ١٣
تنشأ ق . د . ك متوحدة بين الطرفين b'، b عندما يدور الملف فى مجال مغناطيسى خارجى .

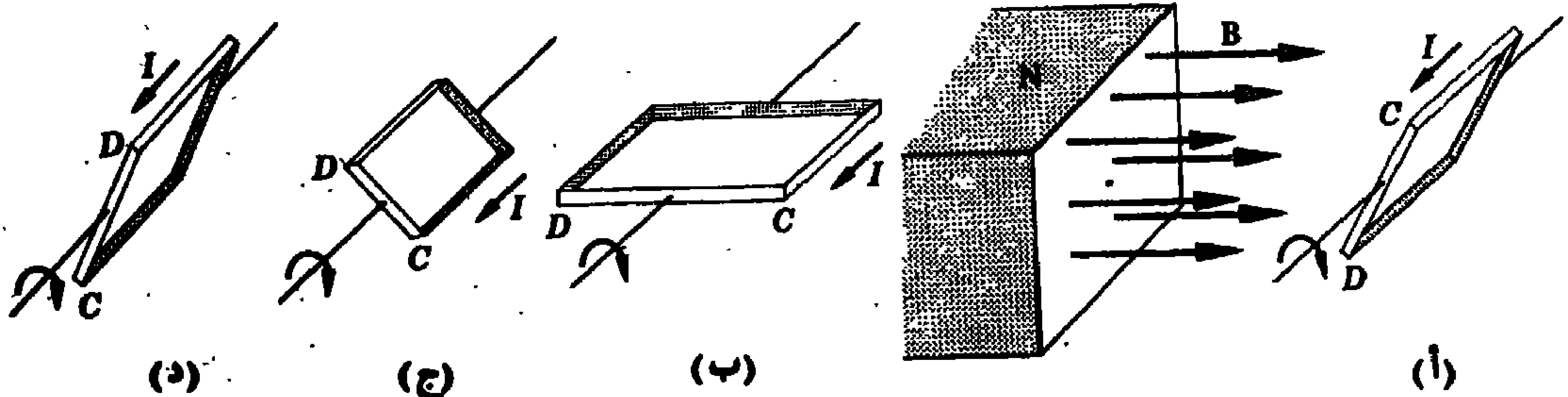


لنرجع إلى الشكل ٢٠ – ١٤ حتى نرى كيف تتولد بالضبط ق . د . ك منتجة بالحث بين طرفى الملف الذى يفترض أنه يدور فى اتجاه عقارب الساعة . ولإيجاد اتجاه سريان التيار نستخدم قانون لنز .

يتضاءل عدد خطوط التدفق خلال الملف كلما دار الملف من الوضع المبين فى الشكل ٢٠ – ١٤أ ، ولهذا تقوم ق . د . ك المنتجة بالحث بدفع تيار فى الاتجاه المبين حتى تزيد من التدفق ، أى لتوازن التغير . عليك أن تفحص كل جزء من الشكل ٢٠ – ١٤ وأن تكون قادرا على أن تشرح بوضوح لماذا يسرى التيار فى الاتجاه المبين . لاحظ أن الجزء (د) هو بالضبط الجزء (أ) فيما عدا أن الملف قد دار . ولكن ق . د . ك المتولدة فى الملف قد عكست اتجاهها فى الذهاب من حـ إلى د ، أى أن التيار فى الملف يعكس اتجاهه فى كل مرة يكون فيها الملف عموديا على المجال .

شكل ٢٠ – ١٤
عندما تدور العروة فى المجال المغناطيسى الخارجى ، فإن اتجاه التيار المستحث ينعكس فيما بين الوضعين المبينين فى (حـ) ، (د) .

يمكن الحصول على تعبير يعطى ق . د . ك فى الملف وذلك باعتبار إما معدل تغير التدفق خلال الملف أو حركة الأسلاك خلال المجال المغناطيسى . فى حالة القدرة على استعمال التفاضل والتكامل فإن طريقة التدفق تكون أكثر ملاءمة ، ولكننا سنستخدم الطريقة الأخرى لأنها لاتحتاج إلى استعمال التفاضل والتكامل .



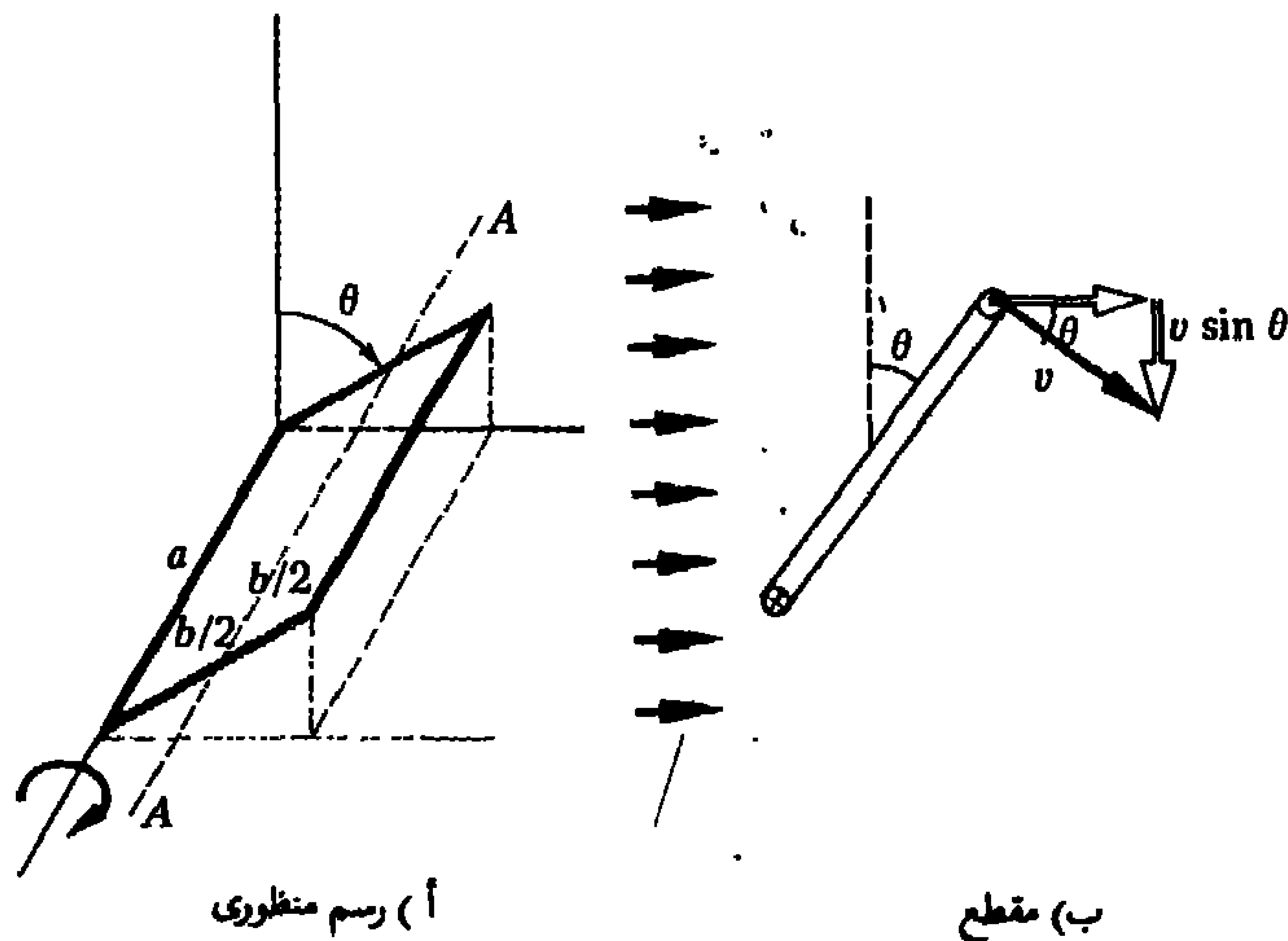
توصلنا فى القسم السابق إلى أن ق . د . ك المنتجة بالحث فى سلك هى Bvd ، حيث وجدنا أن الكميات الثلاث B, v, d يجب أن تكون متعامدة على بعضها البعض.. فإذا لم تكن متعامدة لزم أن نأخذ مركباتها العمودية . تدور العروة المستطيلة التى تحوى N لفة وأبعادها b فى a (حيث a هو البعد عموديا على الصفحة) فى اتجاه عقارب الساعة كما فى الشكل ٢٠ – ١٥ ، القوتان الدافعتان الكهربائيتان المنتجتان بالحث فى جانبى العروة الموازيين للصفحة فى الجزء (ب) تساويان صفرا . ولذلك سنهتم فقط بالقوة الدافعة الكهربائية المنتجة بالحث فى أسلاك العروة التى تتعامد مع الصفحة .

اعتبر الآن أسلاك العروة التى تتعامد مع الصفحة عند قمة الشكل ٢٠ – ١٥ ب ، ق . د . ك المنتجة بالحث فى كل من الأسلاك ستحاول أن تدفع بالتيار إلى خارج الصفحة ، ولما كانت B والسلك متعامدين فعلا لذا فإننا نحتاج أن نضرب فى مركبة v العمودية فقط ، $v \sin\theta$ حتى نحصل على ق . د .ك وبهذا تكون ق د . ك المنتجة بالحث فى كل من أسلاك قمة الملف هى :

$$B(v \sin\theta)a$$

من الواضح أن كل أسلاك القمة ستقوم بحث تيار ليسرى فى نفس الاتجاه ولذا فإن آثارهم ستجمع مع بعضها . علاوة على ذلك ، فإن الأسلاك السفلى للعروة وعددها N ستحاول أن تسبب تيارا يسرى فى اتجاه مشابه حول العروة . نتيجة لهذا تكون ق . د . ك الكلية المنتجة بالحث أكبر $2N$ مرة من القيمة المذكورة فى التعبير السابق ، وعلى هذا نجد أن

ق . د . ك المنتجة بالحث = $2NBav \sin\theta$ (٢٠ – ٨)



شكل ٢٠ – ١٥
ق . د . ك المنتجة بالحث فى العروة المستطيلة سببها السرعة q sine للأسلاك عموديا على الصفحة

من الأمور الأكثر شيوعا ، التعبير عن هذه المعادلة بدلالة السرعة الدورانية ω فنحن نعلم من $v_T = \omega r$ أن $v = \frac{1}{2}b\omega$ وحيث أن $\theta = \omega t$ since فإن لدينا .

$$\text{ق . د . ك} = NB\omega ab \sin \omega t$$

ولما كانت ab هى مساحة العروة A فإن هذا يكافىء :

$$\text{ق . د . ك} = NBA\omega \sin \omega t \qquad (٢٠ - ٩)$$

ق . د . ك المنتجة بالحث فى ملف يدور

المعادلة (٢٠ – ٩) قابلة للتطبيق على أية عروة مسطحة من السلك بغض النظر إذا كانت مستطيلة أم لا . لاحظ أن ω معبر عنها بوحدات radians لكل second ولو أردنا أن نجعلها دورة لكل ثانية rotations/second للزم أن نستفيد من العلاقة $\omega = 2\pi f$

لو أنك رجعت إلى مادرسناه عن الأنظمة المهتزة لرأيت أن المعادلة (٢٠ – ٩) شبيهة بالمعادلة :

$$y = y_0 \sin \omega t = y_0 \sin 2\pi f t$$

التى استخدمت هناك . لقد مثلت هذه المعادلة إزاحة كتلة تهتز عند طرف زنبرك أو أداة مشابهة ، كما تفيدنا هذه العلاقة بأن موضع الكتلة قد اهتز جيئة وذهابا فى حركة جيبية بين $+y_0$ ، $-y_0$. والكمية y_0 هى سعة الاهتزازة ، أما f فكانت عدد الاهتزازات فى الثانية .

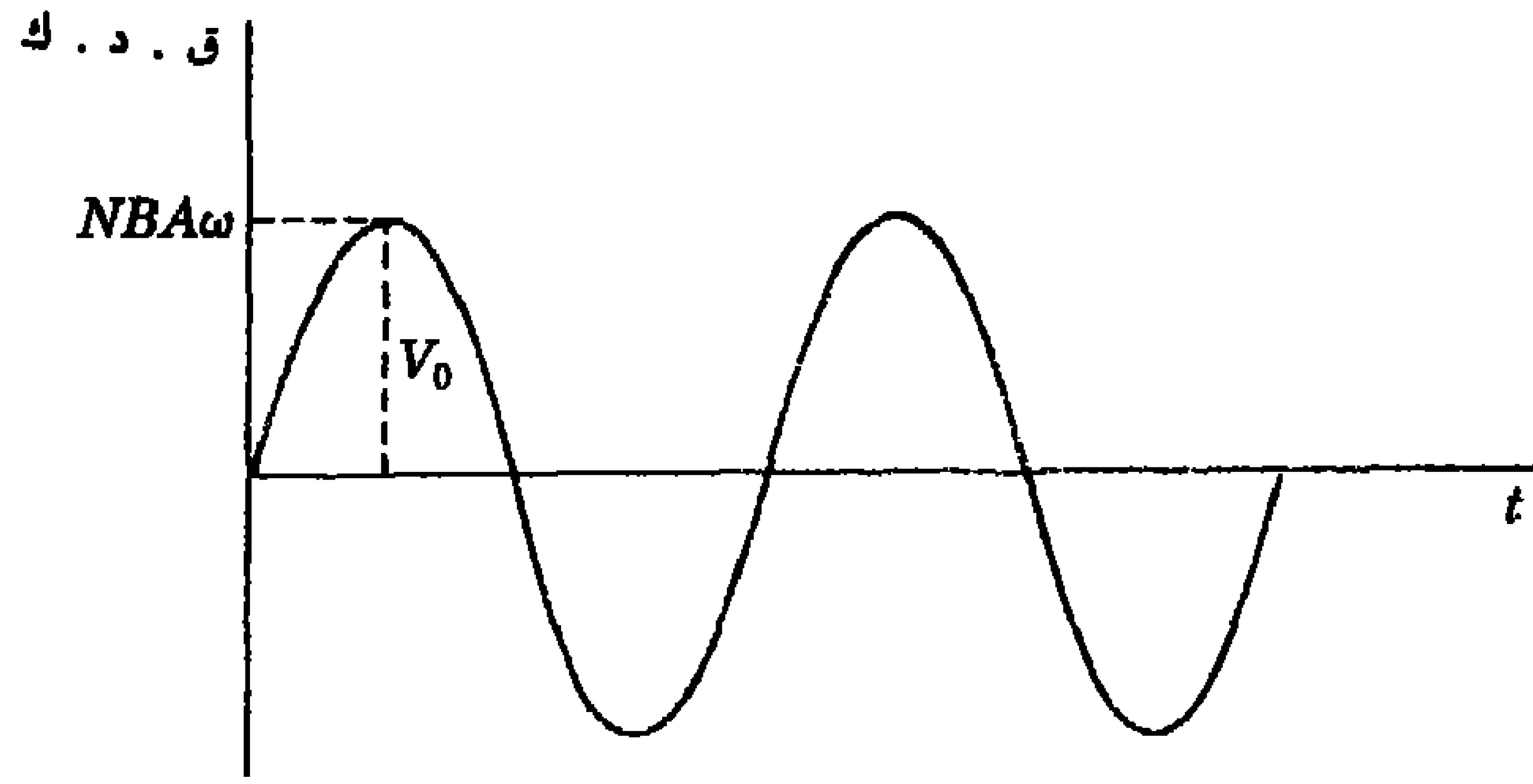
والآن يتضح أن المعادلة ٢٠ – ٩ تنص على أن فرق الجهد بين طرفى ملف يدور يكون متذبذبا جيئة وذهابا ، وفى هذه الحالة تنعكس قطبية الأطراف بشكل تذبذبى . لو كان أحد الأطراف موجبا فى البداية بالنسبة للآخر فسرعان ماتنعكس القطبية بحيث يصبح هو الطرف السالب . والرسم البيانى للعلاقة بين فرق الجهد بين الطرفين كدالة فى الزمن يكون على شكل منحنى جيبى كالمبين فى الشكل ٢٠ – ١٦ . وتشير القيم السالبة إلى مجرد أن ق . د . ك المنتجة بالحث فى الملف قد عكست اتجاهها .

بمقارنة معادلة التذبذب مع المعادلة (٢٠ – ٩) نجد أن سعة الاهتزازة V_0 هى بالضبط $NBA\omega$ فى هذه الحالة وهذهالقيمةمبينه فى شكل ٢٠ – ١٦ . وإذا ماسمينا هذه السعة V_0 فان المعادلة (٢٠ – ٩) تصبح :

جهد متردد

$$V = V_0 \sin 2\pi f t \qquad (٢٠ - ١٠)$$

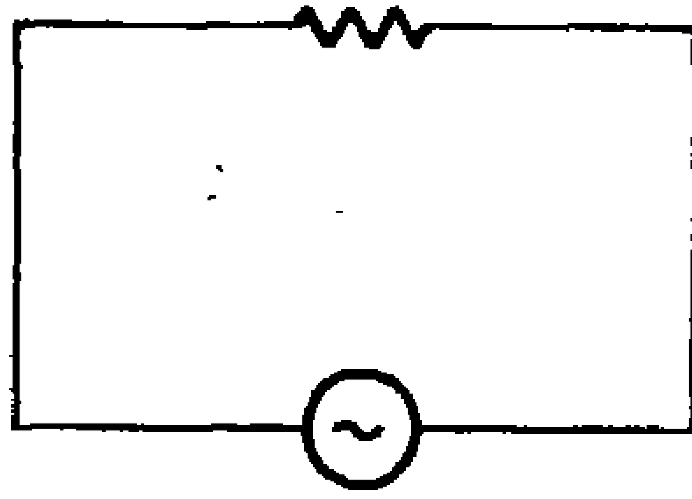
شكل ٢٠ – ١٦
تستحث ق . د . ك متردده
فى مجال مغناطيسى منتظم



وهى تشير بوضوح كاف إلى أن فرق الجهد بين الأطراف يتردد جيبيا .

من الاعتبارات السابقة نجد أن الحقيقة أصبحت واضحة على أن الملف السلكى الذى يدور فى مجال مغناطيسى تتولد عند طرفيه ق . د . ك مترددة . لو استخدم مثل هذا المولد كمصدر للقدرة فى الدائرة البسيطة الموضحة فى شكل ٢٠ – ١٧ فإن التيار المار خلال المقاوم سيعكس اتجاهه $2f$ مرة فى الثانية . (لاحظ أن رمز مولد الجهد المتردد هو~) .

شكل ٢٠ – ١٧
دائرة تيار متردد بسيطة



ومولدات التيار المتردد التى تستخدمها شركات القوى الكهربائية عادة ماتكون أكثر تعقيدا من المولد الذى نناقشه هنا على الرغم من أن أساس عملها هو نفسه . تستخدم التربينات البخارية أو القوى المائية لتوفير الطاقة الميكانيكية اللازمة لإدارة الملف . ولنحاول أن ندرس بايجاز عملية تحويل الطاقة فى نظام كالمبين فى شكل ٢٠ – ١٧ .

لو أن الدائرة كانت مفتوحة بحيث لايمر تيار فى ملف المولد فإننا نحتاج إلى قوة ضئيلة جدا لادارة الملف . ولكن أن يسحب التيار من المولد (الملف) فان المجال المغناطيسى سيؤثر بقوة على أسلاك المولد التى تحمل التيار وتكون هذه القوة فى اتجاه معين بحيث توقف الملف عن الدوران . ومن ثم فالطاقة الميكانيكية التى تغذى المولد تعتمد على التيار المسحوب من المولد أى أن مزيدا من التيار يستلزم مزيدا من الطاقة الميكانيكية .

العلاقة بين الطاقة الكهربائية والميكانيكية

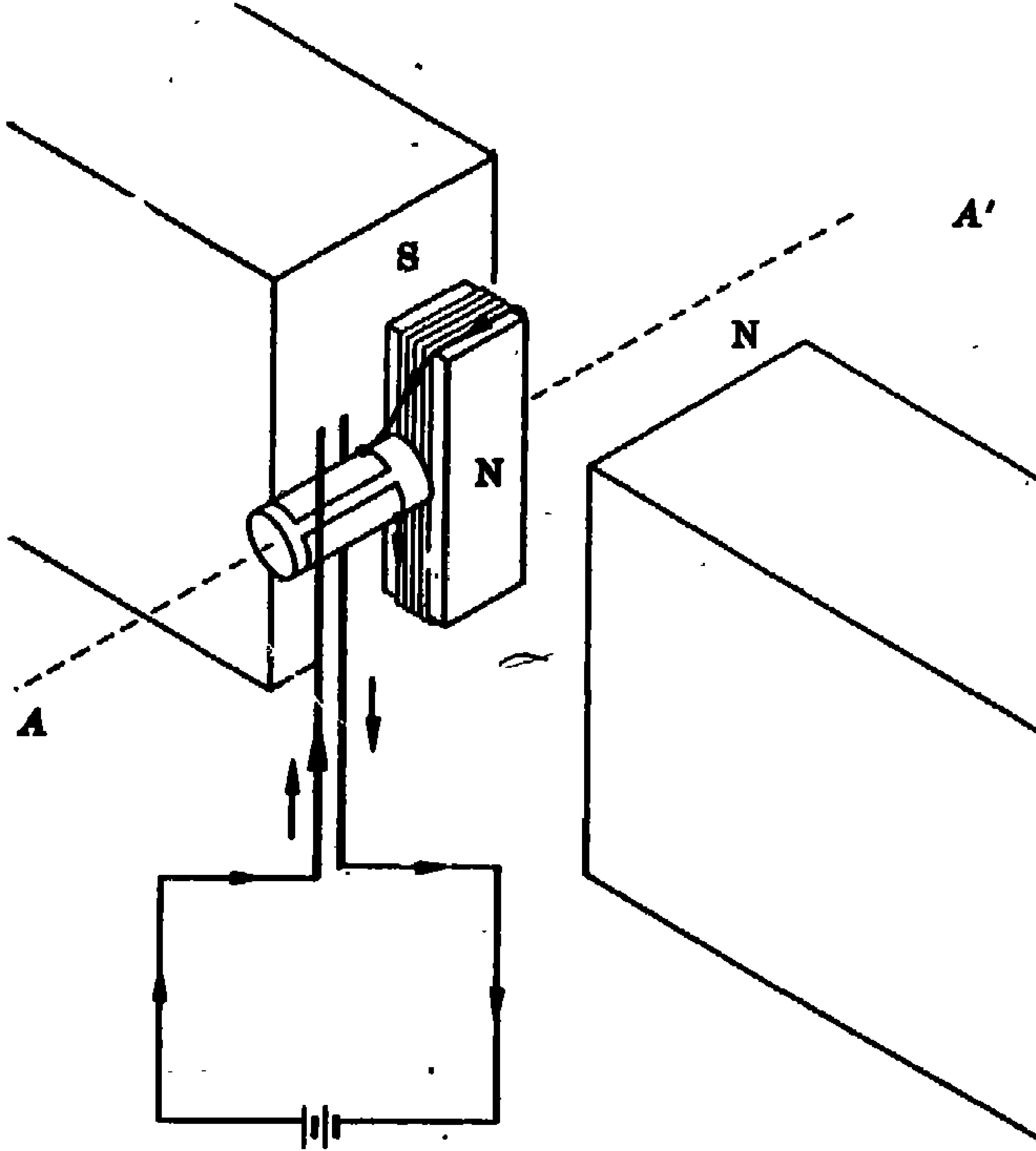
فى لحظة ماعندما يكون جهد المولد V ، فإن القدرة التى تعطى للمقاوم فى شكل ٢٠ – ١٧ تكون VI . من الواضح أنه لو كان I صغيرا جدا فإن القدرة المستهلكة فى المقاوم تكون صغيرة وكذلك تكون الطاقة الميكانيكية اللازمة لتشغيل المولد صغيرة ، وعلى هذا نرى أن الطاقة اللازمة لتشغيل المولد تعتمد مباشرة على الطاقة التى تسحب منه .

وتتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية بواسطة التفاعل بين المجال المغناطيسى وحركة الشحنات داخل ملف المولد .

٢٠ - ١٠ المحركات

المحرك هو أساسا مولد يعمل فى اتجاه عكسى . فكما فى المولد ، يتكون المحرك من ملف يدور فى مجال ناشىء عن مغناطيس . يوضح الشكل المبسط ٢٠ - ١٨ الملف الذى يوضع بين قطبى المغناطيس . من الناحية العملية قد يكون هذا المغناطيس ، مغناطيساً كهربائيا بدلا من مغناطيس دائم . أما الملف نفسه فيلف حول قلب من الحديد الرخو حتى يزيد من المجال المغناطيسى الناشىء عن مرور التيار فيه . ويعمل الملف الحامل للتيار مثل قضيب مغناطيسى كما درسنا من قبل ، وتزداد شدته أكثر من مائة مرة باستخدام القلب الحديدى .

يتنافر القطب الشمالى للملف مع القطب الشمالى للمغناطيس الدائم كما فى شكل ٢٠ - ١٨ . ولو أعطى الملف دورانا طفيفا فى اتجاه ضد حركة عقارب الساعة (عندما ننظر على طول AA' من A الى A') ، فإن الملف سيدفع للدوران نتيجة للتنافر المتبادل بين الأقطاب . عندما يدور الملف $180°$ فإن القطب الشمالى للملف يصبح قريبا من القطب الجنوبى للمغناطيس الدائم وقد يعوقه هذا عن الدوران بعيدا



شكل ٢٠ - ١٨
محرك تيار مستمر بسيط . باعتبار حلقة الانزلاق المبينة ، فى أى اتجاه يدور المحرك ؟

عن هذا الوضع ، ولكن عندما يصل الملف إلى ذلك الوضع فإن الملامسات المنزلقة على حلقة الانزلاق المشقوقة تنزلق فوق الفجوة فينعكس التيار المار خلال الملف ، ويؤدى هذا إلى انعكاس قطبى الملف ومرة أخرى يتحقق الموقف المبين فى الشكل ٢٠ — ١٨ ، فالتنافر محفوظ ونتيجة لهذا يستمر الدوران .

هناك صور مختلفة لمثل هذا المحرك . تتكون معظم المحركات من العديد من العرى الملفوفة بحيث تكون مستوياتها خلال AA' ويكون بين بعضها البعض زوايا مختلفة . يمر التيار فى كل عروة خلال كسر طفيف من دورة وذلك فى الوقت الذى يكون اتجاه العروة بالنسبة للمجال بحيث تحصل على أقصى عزم دوران ممكن . ومثل هذا المحرك يعطى عزما أكثر انتظاما بكثير مما يمكن الحصول عليه من عروة واحدة .

تستعمل بعض المحركات مغناطيسات كهربائية بينما يستعمل البعض الآخر مغناطيسات دائمة للحصول على المجال المغناطيسى . تختلف الطريقة الصحيحة التى توصل بها ملفات المغناطيس والملف الذى يدور (أو عضو الانتاج) من محرك لآخر ، فبعض المحركات يعمل بكل من جهود التيار المستمر والتيار المتردد بينما يعمل البعض الآخر إما بأحدهما أو بالآخر فقط . يمكن للطالب الاطلاع على مراجع أخرى لمزيد من الوصف المتكامل لهذه الأجهزة .

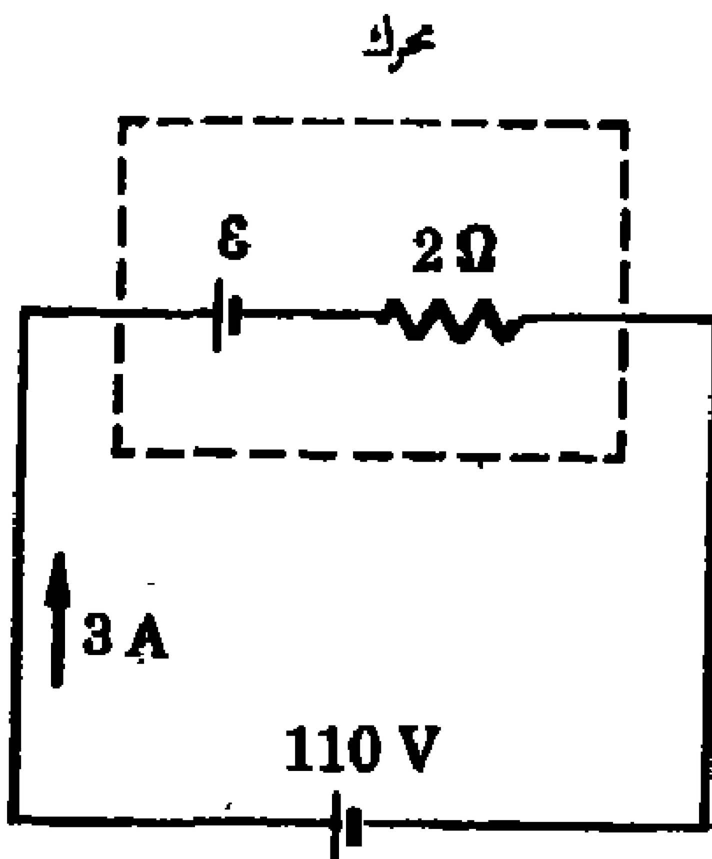
ق . د . ك المضادة (أو الخلفية)

وقبل أن نترك موضوع المحركات سنشير إلى أن التيار المار خلال المحرك يتم التحكم فيه أساسا عن طريق ق . د . ك المضادة وهى ق . د . ك منتجة بالحث وسنناقشها فيما يلى (تكون مقاومة المحرك الجيد صغيرة جدا عادة) . عندما يدور الملف (أو عضو الانتاج) فى مجال المغناطيس الدائم فإن ق . د . ك تستحث فيه . وتكون ق . د . ك المنتجة بالحث ذات اتجاه بحيث تعاكس ق . د . ك التى تبعث بالتيار خلال الملف ، ولهذا السبب سميت ق . د . ك . خلفية أو مضادة ، ولما كانت مقاومة المحرك صغيرة عادة فإن مايحد من قيمة التيار خلاله هو هذه الـ ق . د . ك المضادة . إذا كان المحرك قد حمل فوق طاقته فإنه يبطىء وعندئذ يقوم بسحب تيار أكبر من المنبع (لماذا ؟) وهذا التيار المتزايد الذى يسرى خلال المحرك فوق طاقته يصير فى لحظة ما كبيرا بدرجة تكفى لاحراق المحرك .

مثال توضيحى ٢٠ — ٤ محرك خاص له مقاومة قدرها 2.0 Ω وحين يعمل بشكل طبيعى من خط 110V فإنه يسحب تيارا قدره 3.0A . ماهى قيمة ق . د . ك المضادة التى يولدها ؟

طريقة الحل : يمكن تصور المحرك كما لو كان بطارية متصلة على التوالى مع مقاومة . وحيث أن البطارية ستمثل ق . د . ك المضادة لذا فهى تعاكس مصدر القدرة الذى يشغل المحرك . والموقف بأكمله مبين فى شكل ٢٠ — ١٩ . بتجميع البطاريات وتطبيق قانون أوم نجد أن :

شكل ٢٠ — ١٩
يمكن تمثيل المحرك كما لو كان مقاومة متصلة على التوالى مع ق . د . ك مضادة ع.



$$110\ V - \mathcal{E} = (3\ A)(2\ \Omega)$$
$$\mathcal{E} = 104\ V$$

ملخص

حين يوضع ملف يحمل تياراً فى مجال مغناطيسى **B** فإنه يتعرض لعزم لى . تبلغ قيمة عزم اللى المؤثر على ملف مسطح يحتوى على N عروة ومساحته A لمقدار $ANIB \sin \theta$ حيث θ هى الزاوية بين **B** والعمود المقام على المساحة . تبلغ قيمة العزم المغناطيسى لعروة تيـار $\mu = IA$ وهـذا العزم متجه وله اتجاه يعطى بقاعدة اليد اليمنى المعدلة . يميل المجال المغناطيسى إلى جعل متجه العزم المغناطيسى يتخذ اتجاه خطوط المجال .

تستخدم فى الأميترات والفولتميترات حركة الجلفانومتر ، التى تتكون من ملف موجود فى مجال مغناطيسى . يدور الملف بحيث يكون الدوران متناسبا مع التيار المار خلاله . تحتوى الأميترات على مقاومة مجزئة ضئيلة متصلة على التوازى مع الحركة ، أما الفولتميترات فتحتوى على مقاومة عالية متصلة على التوالى مع الحركة .

حين يتغير التدفق خلال الملف فإن ق . د . ك تستحث فى الملف ، ويكون مقدارها $N(\Delta\phi/\Delta t)$ حيث N هو عد العرى بالملف ، وتسمى هذه المعادلة قانون فاراداى . أما اتجاه التيار الناشىء عن ق . د . ك فيعطى بقانون لنز . تكون ق . د . ك المنتجة بالحث فى اتجاه معين بحيث أن التدفق الناشىء عن التيار يميل إلى موازنة التغير الأصلى فى التدفق خلال العروة .

إذا تغير التيار فى أحد الملفات بمعدل $\Delta I/\Delta t$ فإنه يستحث ق . د . ك فى ملف آخر مجاور ، وتعرف المحاثة المتبادلة للملفين بالمعادلة ق . د . ك $= -M(\Delta I/\Delta t)$

حين يتغير التيار فى ملف ما ، فإن ق . د . ك تستحث فى نفس الملف ، وتعطى ق . د . ك المستحثة ذاتيا بالمعادلة ق . د . ك $= -L(\Delta I/\Delta t)$ حيث L هى المحاثة الذاتية للملف . تقاس كل من L, M بوحدات الهنرى **henry (H)** .

حين يتحرك سلك طوله d بسرعة v عموديا على مجال مغناطيسى **B** فإن ق . د . ك المنتجة بالحث تساوى $B_\perp vd$ وتظهر بين طرفى السلك . وكلما قام السلك بقطع خطوط المجال المغناطيسى فإن ق . د . ك منتجة بالحث تظهر فيه .

يتكون مولد عادى للجهد المتردد من ملف واحد على الأقل يدور فى مجال مغناطيسى . يقوم التدفق المتغير خلال الملف بإنتاج ق . د . ك جيبية بالحث داخل الملف . إذا كان الملف يدور بتردد مقداره f ، فإن ق . د . ك المنتجة بالحث تعطى بالمعادلة $V = V_0 \sin(2\pi f t)$

حيث أن المحركات تتكون من ملف يتحرك فى مجال مغناطيسى ، لذا فهى تحتوى على ق . د . ك منتجة بالحث فى الملف ، وتكون هذه عبارة عن ق . د . ك خلفية من شأنها معاكسة منبع الجهد الذى يدير المحرك . تحت ظروف التشغيل الطبيعية ، يكون التيار خلال المحرك محدودا فى أغلب الأحوال بهذه الـ ق . د . ك الخلفية .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند إتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تشرح السمات الرئيسية لحركة جهاز القياس . وأن تذكر كيف تستعمل فى صنع أميتر أو فولتميتر .

٢ – أن تحسب المقاومة المجزئة المطلوبة لجعل حركة معينة تلائم أميتراً ذا مدى محدد .

٣ – أن تحسب المقاومة المتصلة على التوالى ، والمطلوبة لجعل حركة معينة تلائم فولتميترا ذا مدى محدد .

٤ – أن تذكر فى أى اتجاه يدور ملف يحمل تيارا حين يوضع فى موقع معين فى مجال مغناطيسى . وأن تحسب عزم اللى المؤثر على الملف حين تتوفر لديك البيانات .

٥ – أن تشير إلى موقع القطب الشمالى والجنوبى الفعالين بالنسبة لعروة تحمل تيارا.أن تشرح ما المقصود بمتجه العزم المغناطيسى لعروة تيار .

٦ – أن تعطى اتجاه ق . د . ك المنتجة بالحث فى ملف نتيجة لتغير تيار مجاور أو لمغناطيس متحرك وأن تصف بطريقة كيفية سلوك ق . د . ك كدالة فى الزمن فى تجربة بسيطة تتضمن دائرة مجاورة أو مغناطيس وتربط إجاباتك بقانونى لنز وفاراداى .

٧ – أن تستخدم قانون فاراداى بطريقة كمية فى مواقف بسيطة كالمبينة فى الأمثلة التوضيحية ٢٠ – ٢ ، ٢٠ – ٣ .
٨ – أن تعرف المحاثة المتبادلة والذاتية وأن تشرح سماتهم الكيفية فى إطار قانون فاراداى .
٩ – أن تشرح بطريقة كيفية لماذا تتولد بالسلك الذى يقطع خطوط مجال مغناطيسى ق . د . ك بين طرفيه ، وأن تحسب ق . د . ك هذه فى حالة سلك يتحرك عموديا على خطوط المجال .
١٠ – أن ترسم تخطيطيا تفاصيل مولد بسيط للتيار المتردد ، وأن تشرح كيف ينتج عنه جهد متردد . وأن ترسم العلاقة البيانية بين الجهد والزمن .
١١ – أن تشرح معنى ق . د . ك خلفية محرك ما وكيف أنها تعتمد على سرعة المحرك .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

حركة جهاز القياس

مقاوم مجزىء

$\tau = ANIB \sin \theta$

العزم المغناطيسى ، $\mu = IA$

قانون فاراداى ، ق . د . ك= $-N(\Delta\phi/\Delta t)$

قانون لنز

المحاثة المتبادلة والذاتية

ق . د . ك الحركية = $B_{\perp}vd$

الجهد الناشىء عن تيار متردد ، $V = V_0 \sin(2\pi ft)$

ق . د . ك المضادة (أو الخلفية)

أسئلة وتخمينات

١ – ماهى العوامل الهندسية التى تؤثر فى مدى حساسية حركة جلفانومتر ؟
٢ – لماذا يستعمل فى الفولتميتر « الجيد » حركة أكثر حساسية عن تلك التى فى الأجهزة الرخيصة ؟ ماهى أوجه الجودة ؟
٣ – لماذا يستعمل فى الأميتر « الجيد » حركة أكثر حساسية عن تلك التى فى الأجهزة الرخيصة ؟ ماهى أوجه الجودة ؟
٤ – يدعى مخترع أن لديه مولداً كهربائياً يستطيع تشغيل محرك ، يقوم بدوره بتشغيل المولد ، وتستخدم التيارات الإضافية من المولد فى إضاءة مصابيح وخلافه . ماهو رأيك فى هذه الفكرة ؟ لماذا ؟
٥ – يقودنا قانون حفظ الطاقة إلى استنتاج أن ق . د . ك المنتجة ذاتيا بالحث فى ملف يجب أن تكون ق . د . ك مضادة . اشرح لماذا وهل ينطبق نفس الشىء على ق . د . ك المنتجة بالحث فى محرك ؟ هل يمكن ابتكار آلة حركة دائمة لو أن ق . د . ك المنتجة بالحث لم تكن فى الاتجاه المعطى بقانون لنز ؟
٦ – يقوم المحرك المحمل فوق طاقته دائما بحرق المصهر قبل أن يحدث تلف أكبر . اشرح ماالذى حدث .
٧ – اشرح لماذا يمكن تشغيل محرك يستعمل مغناطيسا دائما بواسطة تيار مستمر وليس تيار متردد بينما يمكن تشغيل نفس الموتور على النوعين إذا كان يستعمل به مغناطيس كهربى .
٨ – يحمل سلك طويل مستقيم تيارا على طول سطح منضدة مستوية . تستقر عروة مستطيلة من السلك فوق نفس المنضدة . إذا اطفىء التيار فى السلك الطويل ، ففى أى اتجاه سوف يسرى التيار المستحث فى العروة ؟ ارسم شكلا للمواقع المختلفة بالنسبة للسلك مبينا فى أى اتجاه سيمر التيار المستحث فى العروة .

٩ – كيف يمكن التأكد من أن الارض تتحرك خلال مجال مغناطيسى منتظم ؟ هل يمكن القول عما إذا كانت الأرض تتحرك خلال المجال أو أنها تحمل المجال معها دائما ؟

١٠ – تستقر حلقة نحاسية فوق منضدة وهناك ثقب فى المنضدة يقع عند مركز الحلقة لو أن قضيبا مغناطيسيا ثبت رأسيا بحيث كان قطبه الجنوبى أعلى المنضدة ثم ترك ليسقط خلال الثقب ، فصف القوى التى تؤثر على المغناطيس .

١١ – تتجه أنبوبة نحاسية طويلة جدا فى الاتجاه الرأسى . صف حركة قضيب مغناطيسى أسقط بداخل الأنبوبة .

١٢ – هل من الممكن تصميم طائرة أو صاروخ بحيث يستفاد من التفاعل بين المجال المغناطيسى للأرض وتيار كهربائى كآلية للدفع ؟

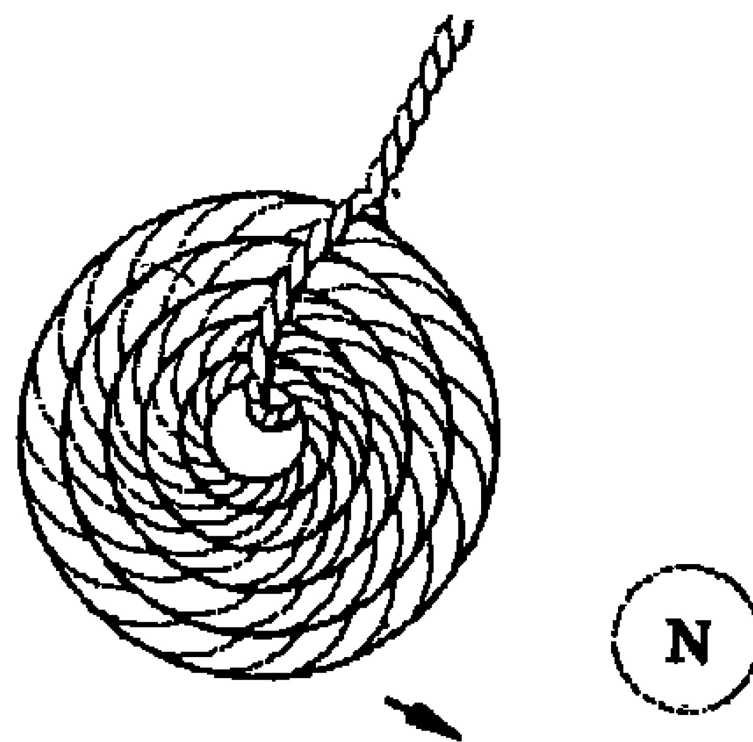
١٣ – هناك عزم مغناطيسى للالكترون ذاته . كيف يمكن تفسير هذا وصفيا فى ضوء نموذج كرى للالكترون يقوم بعملية تدويم ؟ اجعل المناقشة ممتدة لتشمل النيوترون الذى ، على الرغم من كونه غير مشحون ، إلا أن له أيضا عزما مغناطيسيا .

١٤ – بطارية 6V وصلت على التوالى مع مفتاح سكينى ، ومقاومة 2-Ω ومحاثة ذاتية مقدارها 0.5H . الوزن اللازم للتيار لكى يصعد إلى حوالى ثلثى قيمته العظمى بعد أن يغلق المفتاح هو $L/R = 0.25s$. احسب ق . د . ك المنتجة بالحث فى ملف المحاثة عندما (أ) يغلق المفتاح أولا و (ب) عندما يفتح المفتاح فجأة . (ق)

١٥ – افترض أن كمية الشحنة التى يمكن وضعها على أسطوانة حاكى عند دلكها بقطعة من القماش الجاف هى $1 \times 10^{-6}C$. ماهو مقدار عزم اللى بالتقريب ، الذى يؤثر على الاسطوانة أثناء دورانها فوق منضدة دوارة فى المجال المغناطيسى للأرض ؟ ماهو مقدار عزم اللى بالتقريب اللازم لدفع الأسطوانة من فوق المنضدة الدوارة ؟ (ق)

١٦ – حين تتأرجح مجموعة من العرى السلكية أمام قطب مغناطيسى شمالى ، كما فى الشكل (م ٢٠ – ١) فإن **تيارات دوامية** تستحث فيها . وضح اتجاه التيارات فى وقتين مختلفين وبين القوة المؤثرة على العرى . هناك تيارات دوامية مشابهة تنشأ فى قطع صلبة من المعدن . اشرح .

١٧ – تستخدم التيارات الدوامية فى مضاءلة حركة الملفات فى الجلفانومترات الحساسة ، فتلك الملفات تكاد تكون عديمة الاحتكاك تماما ولذا فهى تتأرجح لفترة طويلة إذا سمح لها . ولكن عند توصيل طرفى الملف معا فإن الملف يتوقف عن التأرجح فورا . لماذا ؟ تسمى هذه الظاهرة المضاءلة المغناطيسية .



شكل م ٢٠ – ١

مسائل

١ – فى جلفانومتر ماكانت الحركة ذات مقاومة قدرها 40 Ω وتنحرف ملء التدريج عند جهد قدره 100 mV عبر طرفيها . كيف يمكن تحويلها الى أميتر 2.A ؟

٢ – إذا كانت حركة جهاز للقياس تنحرف ملء التدريج لتيار قدره 0.010A وكانت مقاومتها 50 Ω كيف يمكن تحويلها إلى أميتر 5.A ؟

٣ – كيف يمكن تحويل حركة جهاز القياس الموصوفة فى المسألة رقم (٢) إلى فولتيمتر 2. V ؟

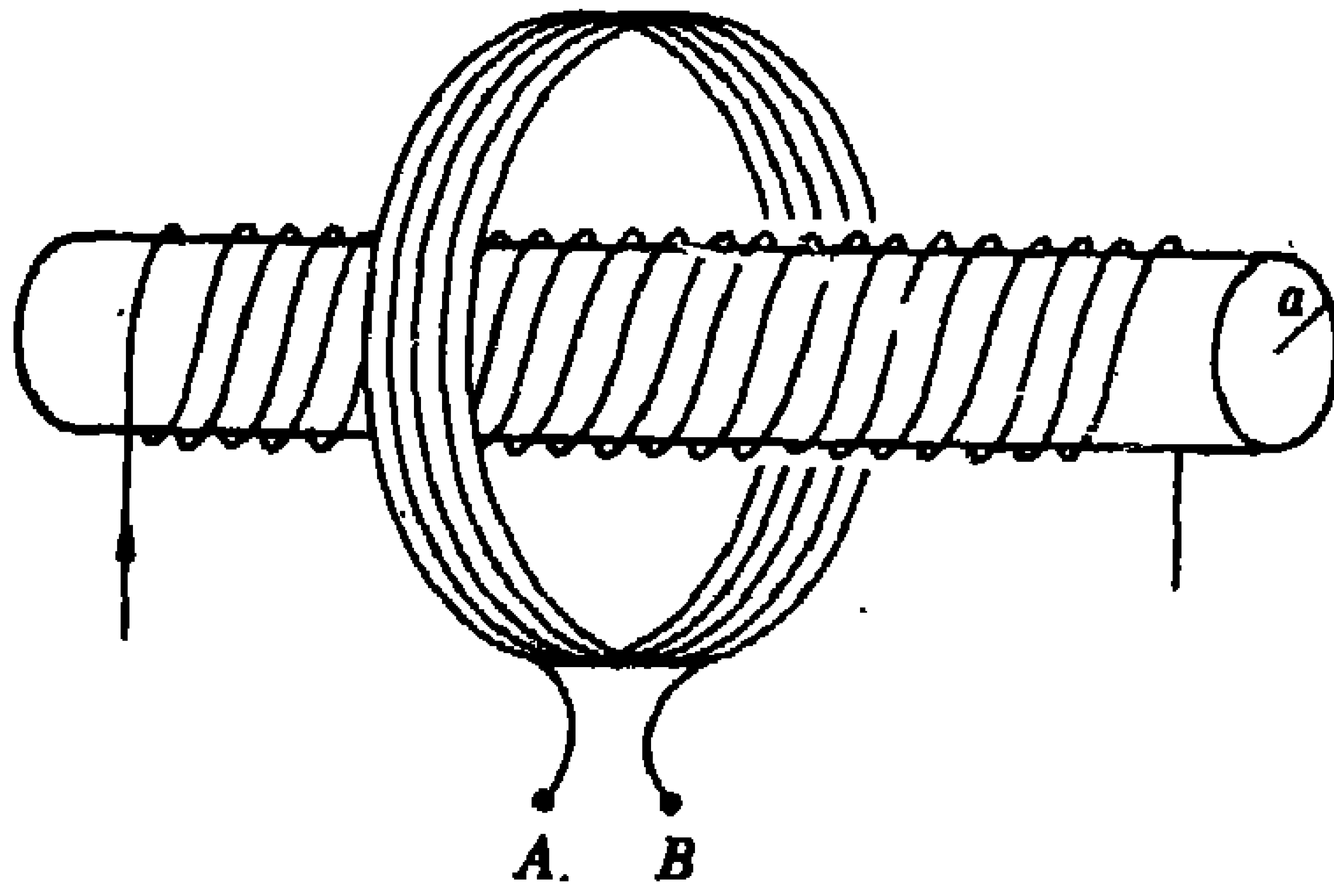
٤ – كيف يمكن تحويل حركة الجلفانومتر الموصوفة فى المسألة رقم (١) إلى فولتيمتر 50. V ؟

٥ –* كيف يمكن تحويل حركة جهاز القياس الموصوفة فى المسألة رقم (٢) إلى اميتر ذى مديين 1A,10A ؟

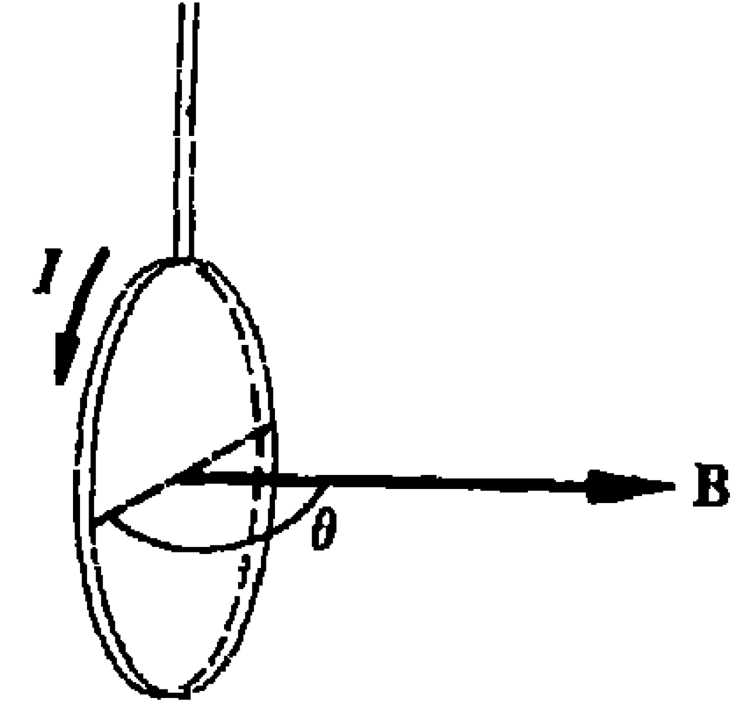
٦ – * كيف يمكن تحويل حركة جهاز القياس الموصوفة فى المسألة رقم (٢) إلى فولتميتر ذى مديين 12V . 120 V ؟

٧ – يحتوى ملف مسطح على 30 عروة من السلك ونصف قطر كل عروة هو 2.0 cm . ماهو العزم المغناطيسى لهذا الملف عندما يمر خلاله تيار قدره 5.0A ؟

٨ – يعلق الملف الموصوف فى المسألة (٧) فى مجال مغناطيسى كما هو مبين فى شكل م ٢٠ – ٢ . (أ) اوجد عزم اللى المؤثر عليه (ب) هل يميل الملف الى الدوران بحيث يزيد أم ينقص من قيمة الزاوية (θ) ؟ الزاوية (θ) هى $120°$.



شكل م ٢٠ – ٣



شكل م ٢٠ – ٢

٩ – *يحمل ملف دائرى نصف قطره 5.0 cm وبه 20 عروة من السلك تيارا قدره 25A. يستقر الملف على سطح منضدة أفقية ، ويسرى به تيار فى اتجاه عقارب الساعة حين ينظر إليه من أعلى . يؤثر على الملف المجال المغناطيسى للأرض والذى يتجه فى تلك النقطة شمالا وإلى أسفل بزاية ميل قدرها $55°$. تبلغ قيمة B – 0.85G (أ) اوجد عزم اللى الناشىء عن B والذى يؤثر على الملف . (ب) أى أجزاء الملف سيحاول أن يرتفع من على سطح المنضدة ، الشمالى ، الشرق ، الجنوبى أم الغربى ؟

١٠ – *يبين الشكل م ٢٠ – ٣ ملفا من السلك (نصف قطره b) ملفوفا حول ملف لولبى (نصف قطره a) . الملف اللولبى أكثر طولا بكثير – عما هو مبين بالشكل . لو كان المجال المغناطيسى فى الملف اللولبى يتغير بمعدل 0.020 T كل ثانية ، (أ) اوجد ق . د . ك . المنتجة بالحث فى الملف الخارجى الذى يحتوى على N عروة بينما يحتوى الملف اللولبى على n عروة لكل متر من طوله . (ب) لو أن قضيبا حديديا له $\mu = 300\mu_0$، وضع بداخل الملف اللولبى لكى يملأه ، فما هى ق . د . ك المنتجة بالحث فى الملف الخارجى ؟

١١ – يتزايد التيار فى ملف لولبى ذى قلب هوائى بمعدل يبلغ 2.0 A/s . هناك 10^6 لفة من السلك بالملف اللولبى على كل متر من طوله ، وتبلغ مساحة مقطعه $2 \times 10^{-4}\ m^2$ هناك ملف ثانوى ذو 10^4 لفة ملفوف فوق الملف اللولبى . ماهى قيمة ق . د . ك المستحثة فى الثانوى ؟

١٢ – يبلغ متوسط المجال الناشىء داخل ملف حلقى ذى قلب حديدى 1.40T هناك ملف ثانوى ملفوف على الملف الحلقى ويحتوى على 100 لفة . لو أن مساحة مقطع الملف الحلقى كانت $0.5\ cm^2$ فما هو متوسط ق . د . ك المنتجة بالحث فى الملف الثانوى إذا كان التيار فى الملف الحلقى يتوقف على مدى 0.010s ؟

١٣ – يمكن لقضيب مغناطيسى الحركة دخولا أو خروجا من ملف ذى 100 لفة بحيث يكون الملف محكما حول القضيب . لقد وجد أن ق . د . ك متوسطة قيمتها 0.30V تستحث فى الملف عندما يلج القضيب فيه فجأة على مدى 0.10s . إذا كانت مساحة مقطع المغناطيس $2.0\ cm^2$ ، فما هى قيمة B فيه ؟

١٤ – **ملفان ملفوفان بإحكام على نفس القلب الحديدى . تبلغ مساحة المقطع لكليهما $4.0\ cm^2$ حين يسرى تيار مقداره 3.0 A فى الملف الابتدائى فإن B تكون $0.20\ Wb/cm^2$. هناك 100 لفة على الملف الثانوى . (أ) ماهى قيمة ق . د . ك المنتجة بالحث فى الثانوى إذا كان التيار فى الابتدائى ينخفض بانتظام إلى الصفر فى زمن قدره 0.05 s ؟ (ب) ماهى الحاثة المتبادلة للملفين ؟

١٥ – **يحتوى ملف لولبى طويل ذو قلب حديدى على 1000 لفة ومساحة مقطعه $4.0\ cm^2$،عندما يمر تيار قدره 2.0 A خلاله فإن $B=0.5$ T . (أ) ماهى ق . د . ك المنتجة بالحث بالملف إذا أطفىء التيار على مدى 0.10 s ؟ (ب) ماهو مقدار محاثته الذاتية ؟

١٦ – تطير طائرة معدنية موازية للأرض فى اتجاه الغرب بسرعة تبلغ 200 m/s.لو كانت المركبة الرأسية لمجال الأرض 0.80 G (أ) ماهو فرق الجهد بين طرفى الأجنحة اللذين يبعدان عن بضعهما 25m ؟ (ب) أى طرف من أطراف الأجنحة سيكون موجبا – الشمالى أم الجنوبى ؟ (ج) هل يمكن قياس فرق الجهد هذا ؟ (د) لو كان الأمر كذلك فكيف ؟

١٧ – قرر مهندس أن يضىء الانوار فى محطة قطار باستخدام ق . د . ك المنتجة بالحث فى محاور القطارات التى تسير على القضبان . بافتراض أن المركبة الرأسية لمجال الارض هى $0.8010^3\ Wb/m^2$ وأن قضبان السكك الحديدية تبعد عن بعضها البعض 1.5 m ، (أ) ماهو مقدار ق . د . ك التى تنشأ بين القضبان عندما يمر قطار بسرعة 30 m/s ؟ (ب) هل يمكن استخدام فرق الجهد هذا داخل القطار المتحرك ؟ (ج) اذا كان الأمر كذلك فكيف ؟

١٨ – اذا كان الملف فى مولد مايحتوى على 200 لفة ومساحته $500\ cm^2$ وكان يدور فى مجال مغناطيسى $B=0.60\ Wb/m^2$ فما هى سرعة دوران الملف حتى يمكن توليد جهد اقصى قيمته 150 V ؟

١٩ – كانت مقاومة الملف فى محرك ما $5.0\ \Omega$. عندما يدور المحرك بالسرعة المقدرة فإنه يسحب تيارا قيمته 2.0A من منبع 120 V . (أ) ماهى ق : د . ك المضادة فى المحرك ؟ (ب) كم من التيار يسحبه المحرك إذا توقف الملف عن الدوران ؟

٢٠ – تستغرق المحركات الضخمة مايقرب من الدقيقة حتى تصل إلى سرعتها عقب التشغيل . لأحد هذه المحركات مقاومة مقدارها $0.50\ \Omega$ ويسحب تيارا قدره 8.0A من منبع 120 V . ماهى قيمة المقاومة (مقاومة البداية) التى يجب توصيلها على التوالى مع المحرك إذا لم يكن ليسحب أكثر من 30 A عند بدء التشغيل ؟ (من الطبيعى أن هذه المقاومة تبعد فيما بعد) .

الفصل الحادى والعشرون
التيارات المترددة والدوائر المفاعلة

لقد اهتممنا أساسا فى الفصول القليلة السابقة بالتيارات المستمرة ، أى بالتيارات التى تسرى باستمرار فى اتجاه واحد ، وقد رأينا فى الفصل السابق أن مصدر الجهد ذا القطبية المترددة يمكن الحصول عليه عند ادارة ملف فى مجال مغناطيسى ، ومثل هذا المصدر للجهد المتردد يؤدى الى ظهور تيارات مترددة تلعب بدورها دورا هاما . سنرى فى هذا الفصل كيف تتصرف هذه التيارات حين تمر فى مقاومات ومكثفات و محاثات .

٢١ – ١ شحن وتفريغ مكثف

لنبدأ دراسة الدوائر ذات التيار المتغير بفحص الدائرة البسيطة المرسومة فى شكل ٢١ – ١أ . افترض أن المفتاح كان فى البداية مفتوحا وأنه لا توجد شحنات على المكثف ونريد أن نعرف ماذا سيحدث عندما يغلق المفتاح بشكل فجائى .

ستحاول البطارية أن تبعث تيارا ليسرى فى الدائرة فى اتجاه عقارب الساعة . وحيث أن المكثف لم تكن عليه أية شحنات فى البداية ، فالتيار لا يحدده سوى المقاومة R . لهذا بمجرد إغلاق المفتاح (عند $t = 0$) فإن التيار يصبح $i_0 = V_0/R$. كما فى شكل ٢١ – ١ ب . لكن بمرور الوقت سيصبح المكثف مشحونا وبهذا يقل التيار الى المكثف ، وحين يصير المكثف مشحونا تماما فإن التيار يهبط إلى الصفر . ويوضح الشكل ٢١ – ١ ب الطريقة الدقيقة التى يسلكها التيار فى هذه الدائرة .

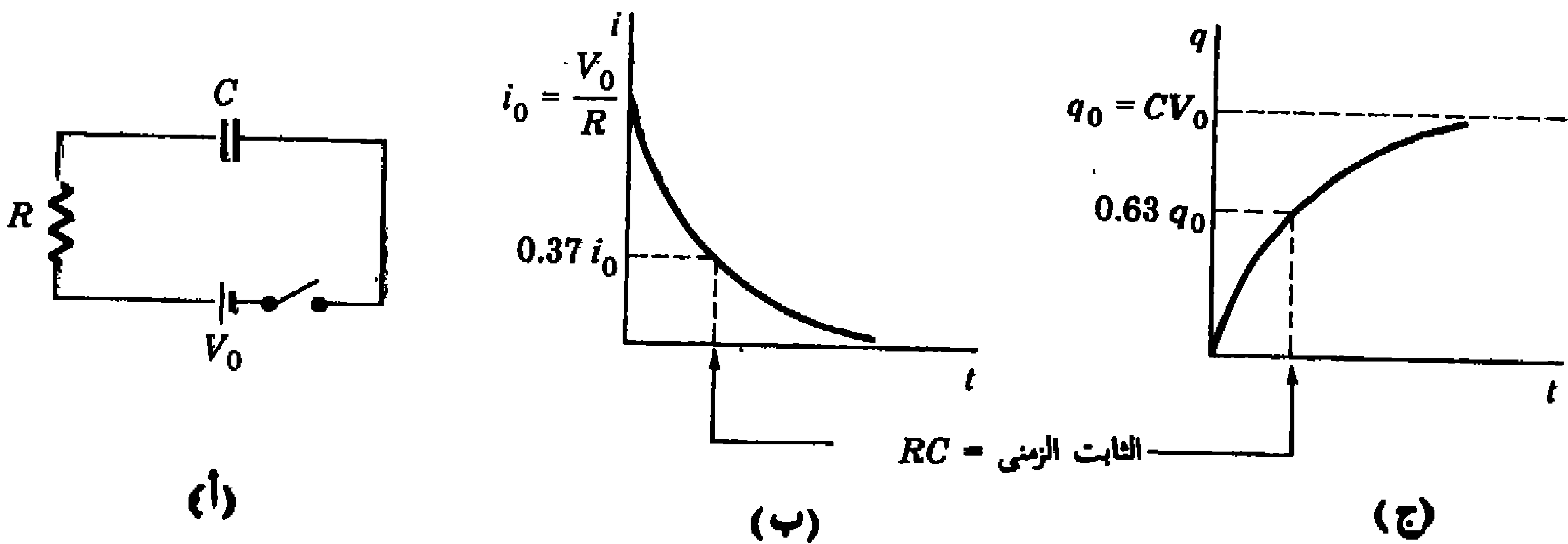
يسمى المنحنى الذى يتبعه التيار فى الجزء (ب) **منحنى الاضمحلال الأسى**بتحليل الدائرة الموضحة فى الجزء (أ) يوضح أن التيار ينخفض إلى ما قيمته $0.3679 i_0$ فى زمن يساوى حاصل ضرب R فى C (من الشيق فى استخدام الوحدات أن تحاول اثبات أن ohm.farad تكافىء ثانية s) .

الثابت الزمنى RC

يسمى حاصل الضرب RC **الثابت الزمنى** لهذه الدائرة، وهو عبارة عن الزمن مقدراً بالثوانى – اللازم للتيار لكى ينخفض بمقدار 0.37 مرة من قيمته الأصلية .

عندما يسرى التيار فى الدائرة فإن المكثف يشحن وحين تكتمل شحنته يصبح لدينا $q_0 = CV_0$ حيث q_0 هى شحنة المكثف وهى تتغير مع الزمن كما هو مبين فى الجزء (جـ) من الشكل . يلاحظ هنا أن الثابت الزمنى يقيس الزمن بالثوانى الذى يستغرقه المكثف لكى يصبح مشحونا إلى ثلثيه . وكما نرى فالثابت الزمنى هو مقياس تقريبى للزمن المطلوب لشحن مكثف .

شكل ٢١ – ١
الثابت الزمنى RC هو مقياس مناسب للزمن الذى يلزم المكثف لكى يشحن أو يفرغ



لو أن مكثفا مشحونا C وصل مباشرة عبر مقاومة R فإن المكثف يقوم بالتفريغ خلالها . فإذا كان فرق الجهد بين طرفى المكثف فى البداية هو V_0 ، فإن التيار الذى يسرى من المكثف أثناء تفريغه سيتبع منحنى كالمبين فى الشكل ٢١ — ١ ب . يسلك تيار التفريغ بالنسبة للمكثف نفس السلوك الذى يسلكه تيار الشحن . أى أن المكثف يفرغ بمقدار الثلثين خلال ثابت زمنى واحد . وهنا أيضا يكون الثابت الزمنى RC مقياسا تقريبياً للزمن المطلوب لهذه العملية .

مثال توضيحى ٢١ — ١ فى معظم أجهزة التليفزيون يوجد مكثف يتم شحنه إلى فرق جهد يبلغ حوالى 20.000V . وكإجراء للأمان يتم توصيل مقاوم عبر طرفى المكثف حتى يفرغ المكثف عقب إطفاء الجهاز . افترض أن هذا المقاوم الذى يطلق عليه مقاومة تجزئية كان $10^6\ \Omega$ وأن $C = 10\ \mu F$. ماهو الوقت التقريبى الذى يجب انتظاره حتى يمكن لمس المكثف بأمان بعد اطفاء الجهاز ؟

طريقة الحل : الثابت الزمنى لهذه الدائرة هو RC وعلى ذلك

$$\text{ثابت الزمن} = (10^6\ \Omega)(10^{-5}\ F) = 10\ s$$

أى أنه بمرور 10s يكون المكثف قد فقد ثلثى شحنته تقريبا . فإذا مر زمن يبلغ عشرة أضعاف هذه القيمة فإن المكثف يكون بالضرورة قد أصبح فارغا . ولذا يجب الانتظار لمدة 100s قبل لمس المكثف فى هذه الحالة .

هناك طريقة أكثر كمية لحل هذه المشكلة إذا توفرت لدينا السمة الخاصة للمنحنى ذى نمط الاضمحلال الأسى ، ففى مثل ذلك المنحنى تقل الكمية بمقدار $0.37 \approx 0.3679$ خلال كل ثابت زمنى أى أن $i = 0.37 i_0$ وعند $t = RC$ فإن $i = (0.37)i_0$ وعند $t = 2RC$ فإن $i = (0.37)^2 i_0$ وعند $t = 3RC$ فإن $i = (0.37)^3 i_0$ وهكذا . بعد عشرة ثوابت زمنية فإن $i = i_0(0.37)^{10}$ وهى تساوى $4.5 \times 10^{-5} i_0$ بعد زمن قدره $t = 10RC$ فإن التيار والشحنة ينخفضان إلى 4.5×10^{-5} من قيمتهما الاصلية

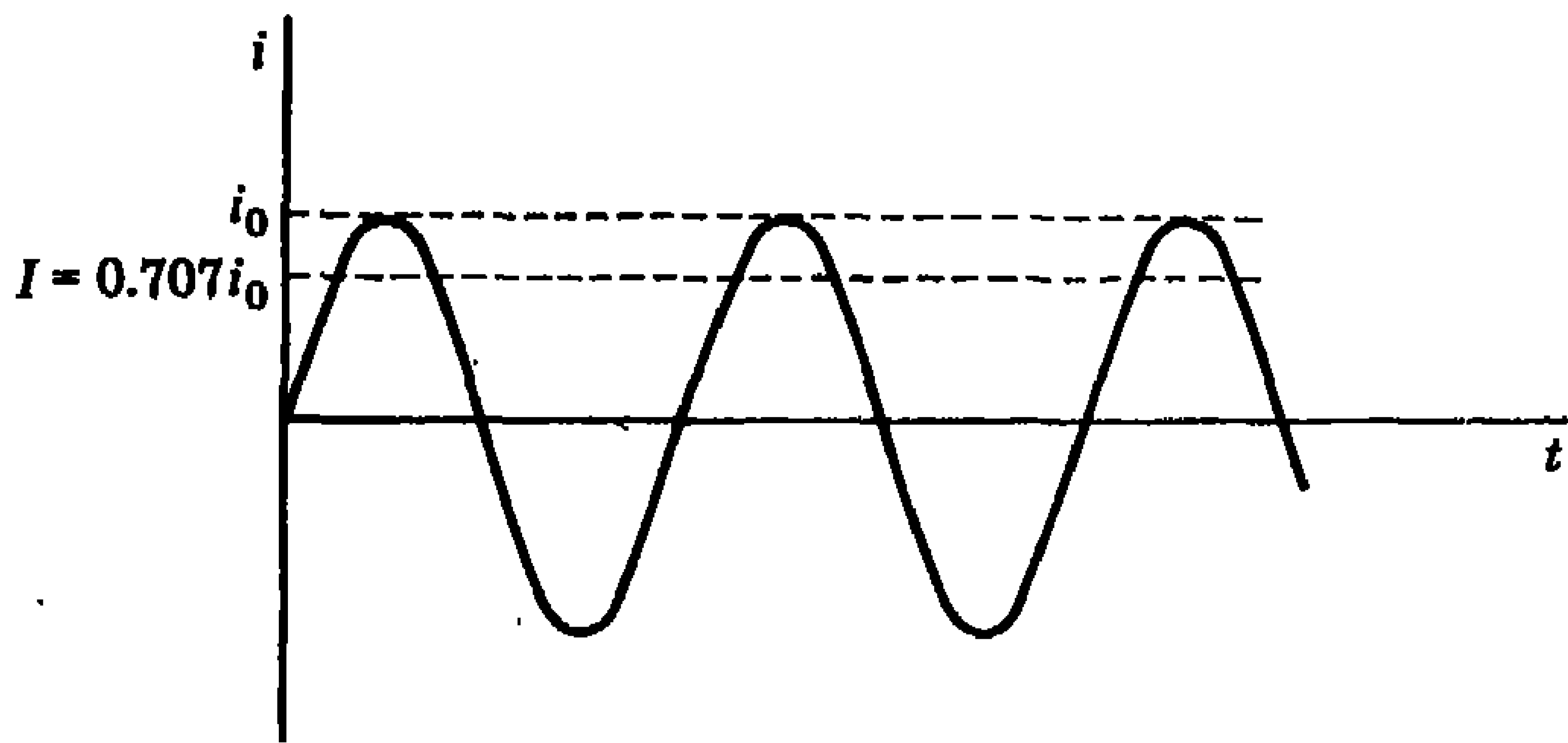
٢١ — ٢ مقادير التيار المتردد ، قيم جذر متوسط المربعات

قد يكون أوسع أنواع الدوائر التى يتغير فيها التيار انتشارا هو مانشير إليه بالرمز (ac) نسبة إلى التيار المتردد . لعلك تذكر أن الملف الذى يدور فى مجال مغناطيسى يؤدى إلى ظهور ق . د . ك جيبية ويسبب هذا النوع من ق . د . ك تيارا مترددا مثل الذى فى الشكل ٢١ — ٢ . والحقيقة أن هذا النوع من الجهود والتيارات هو

القيمة المتوسطة لكميات التيار المتردد

ماتقوم شركات القوى الكهربائية بتوزيعه على عملائها . كل التيارات وفروق الجهد ذات الطابع الجيبى قيمتها المتوسطة تساوى الصفر فى دورة كاملة أو أكثر . وحتى حين يصبح التيار المتردد السارى فى سلك ما كبيرا بحيث يصير السلك ساخنا لدرجة الابيضاض (كما فى المصباح المتوهج) ، فإن التيار المتوسط يكون صفرا . ويمكننا رؤية هذه الحقيقة بسهولة كما سنبين الآن .

يكون التيار المتردد المبين فى شكل ٢١ – ٢ موجبا بقدر مايكون سالبا . لإيجاد قيمته المتوسطة علينا أن نجمع قيمه معا عند فترات مختلفة ثم نقسم المجموع على عدد القيم التى جمعت . من الواضح أن عدد القيم السالبة سيتساوى مع عدد القيم الموجبة للتيار ، وعند جمعهما معا سيكون الناتج صفرا أى أن التيار المتوسط صفر . وباتباع نفس الاسلوب فى التفكير سنجد أن القيمة المتوسطة لجهد متردد هى أيضا صفر .



شكل ٢١ – ٢
يكون التيار الفعال أو جذر متوسط مربع التيار rms بالنسبة لتيار متردد مساويا $i_0/\sqrt{2}$

يمكن للتيار المتردد القيام بشغل مفيد دائما على الرغم من أن قيمته المتوسطة صفرا ، إلا فى حالة بعض التطبيقات مثل الطلاء بالكهرباء وشحن البطاريات .

عند استخدام الكهرباء لإنتاج حرارة فى مقاوم ، مثلا ، كما فى المواقد الكهربائية فإن حقيقة انعكاس اتجاه التيار دوريا لايكون لها أهمية فكل مايعنينا هو الحرارة المتولدة فقط وكما رأينا من قبل فإن هذا تحدده القدره الكهربائية التى يتسلمها المقاوم وهى i^2R (لاحظ أن التيار مربع فى هذه الكمية ولذا ليست هناك أهمية إذا كان سالبا أو موجبا) .

فى الواقع ، نحن معنيون بمتوسط القدرة المعطاة إلى مقاوم أكثر من اهتمامنا بمتوسط التيار المار فيه . وعلى هذا فنحن نهد لإيجاد القيمة المتوسطة للمقدار i^2R. ولكن R مقدار ثابت لذا فنحن فعلا نحتاج الى معرفة القيمة المتوسطة

للمقدار i^2 . والقيمة المتوسطة للمقدار i^2 **ومتوسط مربع التيار** ، هى عبارة عن مجموعة من الارقام الموجبة لأن i^2 دائما موجبة . بالنسبة لتيار (أو جهد) يتغير جيبيا فإن القيمة المتوسطة للمقدار i^2 (أو v^2) هى نصف القيمة العظمى أو $\frac{1}{2}i_0^2$. اما إذا أخذنا جذر هذه الكمية ، **جذر متوسط مربع التيار** (rms) فإن

جذر متوسط مربعات التيار وفرق الجهد

$$I \equiv i_{\text{rms}} = \frac{i_0}{\sqrt{2}} = 0.707 i_0$$

حيث i_0 هى القيمة الذروية للتيار المبين فى الشكل ٢١ – ٢. أما الجهد فيكون

$$V \equiv v_{\text{rms}} = 0.707 v_0$$

حيث v_0 هى القيمة الذروية للجهد أثناء الدورة الجيبية . المقدار 0.707 هو نفسه $1/\sqrt{2}$. دائما ماتسمى قيم (rms) **بالقيم الفعالة** .

تقوم معظم أميترات وفولتميترات التيار المتردد بقراءة قيمة التيار أو الجهد الفعالين . ولكن قد نصادف من حين لآخر جهازا معايرا ليقرأ قيمة الذروة للجهد v_0 أو قيمة الذروة للتيار i_0 . ومن الطبيعى أن معظم أجهزة قياس التيار المستمر (dc) تقرأ القيم المتوسطة ولذا فهى لاتنحرف إذا وصلت إلى أنظمة تيار متردد (ac) . من الطريقة التى عرف بها التيار الفعال أو (rms) فإن فقد الطاقة فى مقاوم هو I^2R حيث I هو قيمة (rms) للتيار . من الطبيعى فى نظام التيار المستمر (dc) أن يكون تيار (rms) والتيار المتوسط والتيار اللحظى هى جميعا نفس الشيء*

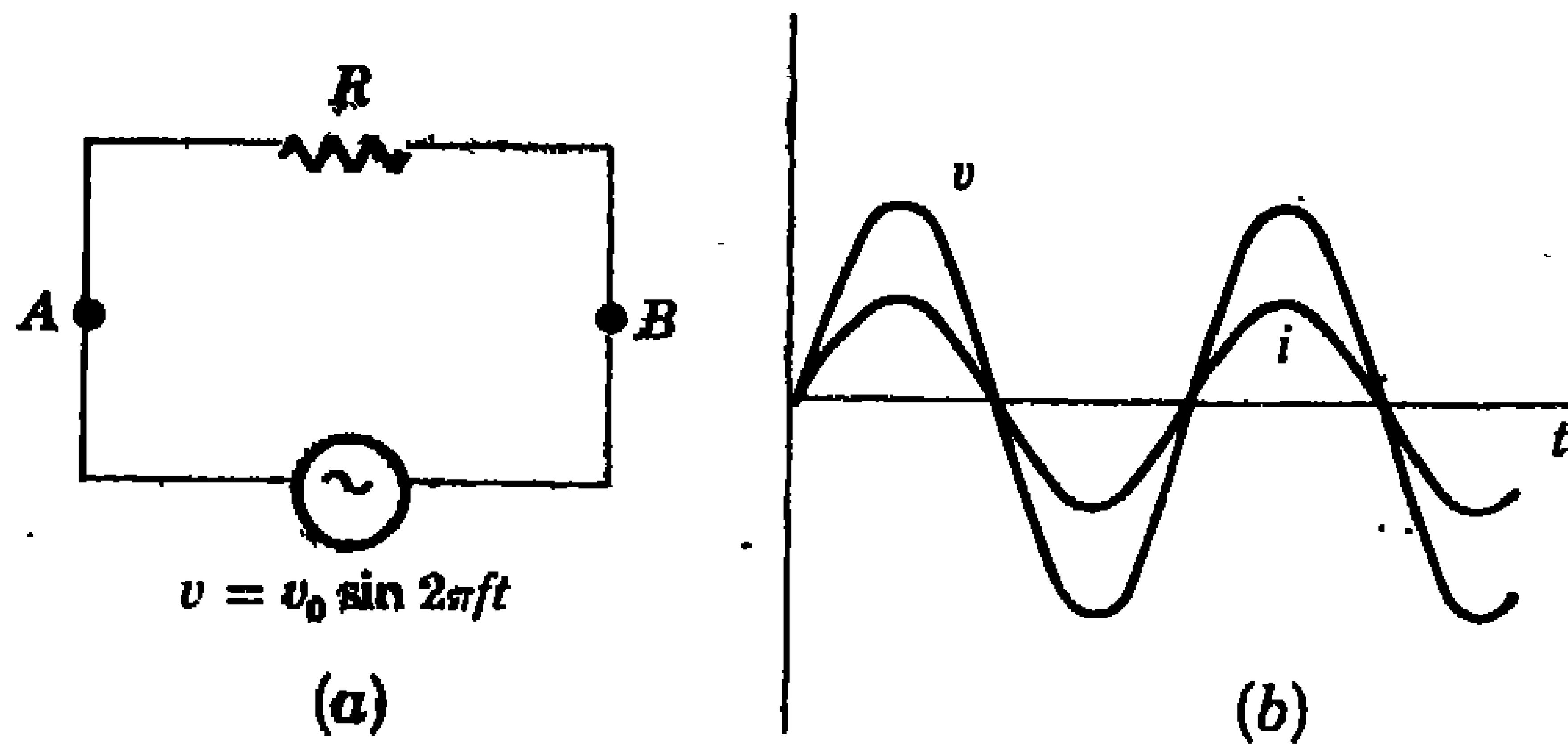
فقد القدرة فى التيار المتردد

٢١ – ٣ دائرة المقاومة

سنقدم موضوع دوائر التيار المتردد عن طريق اعتبار ثلاثة عناصر مختلفة للدائرة كل فى دوره بحيث يتصل العنصر بمصدر للجهد المتردد . لنعتبر اولا دائرة المقاومة البسيطة المبينة فى الشكل ٢١ – ٣أ . يفيدنا قانون أوم على الفور أن فرق الجهد من A إلى B هو iR تماما، وحين يكون فرق الجهد عند أقصى قيمة ، فإن التيار أيضا سيكون عند قيمته العظمى ، وحين يصبح فرق الجهد صفرا يصبح التيار صفرا كذلك . ويوضح الشكل ٢١ – ٣ ب هذا السلوك بيانياً . يقال فى هذه الحالة أن التيار وفرق الجهد متطاوران أى لهما نفس الطور وذلك حين يتغيران معا خطوة بخطوة .

---

*سنستخدم دائما الرمزين I ، V للدلالة على قيم (rms) وهى فى نفس الوقت قراءات أجهزة القياس ، أما الحروف v ، i فستستخدم للدلالة على القيم اللحظية للجهد والتيار .



شكل ٢١ – ٣
يكون التيار داخل مقاوم متطاوراً مع فرق الجهد عبر طرفيه .

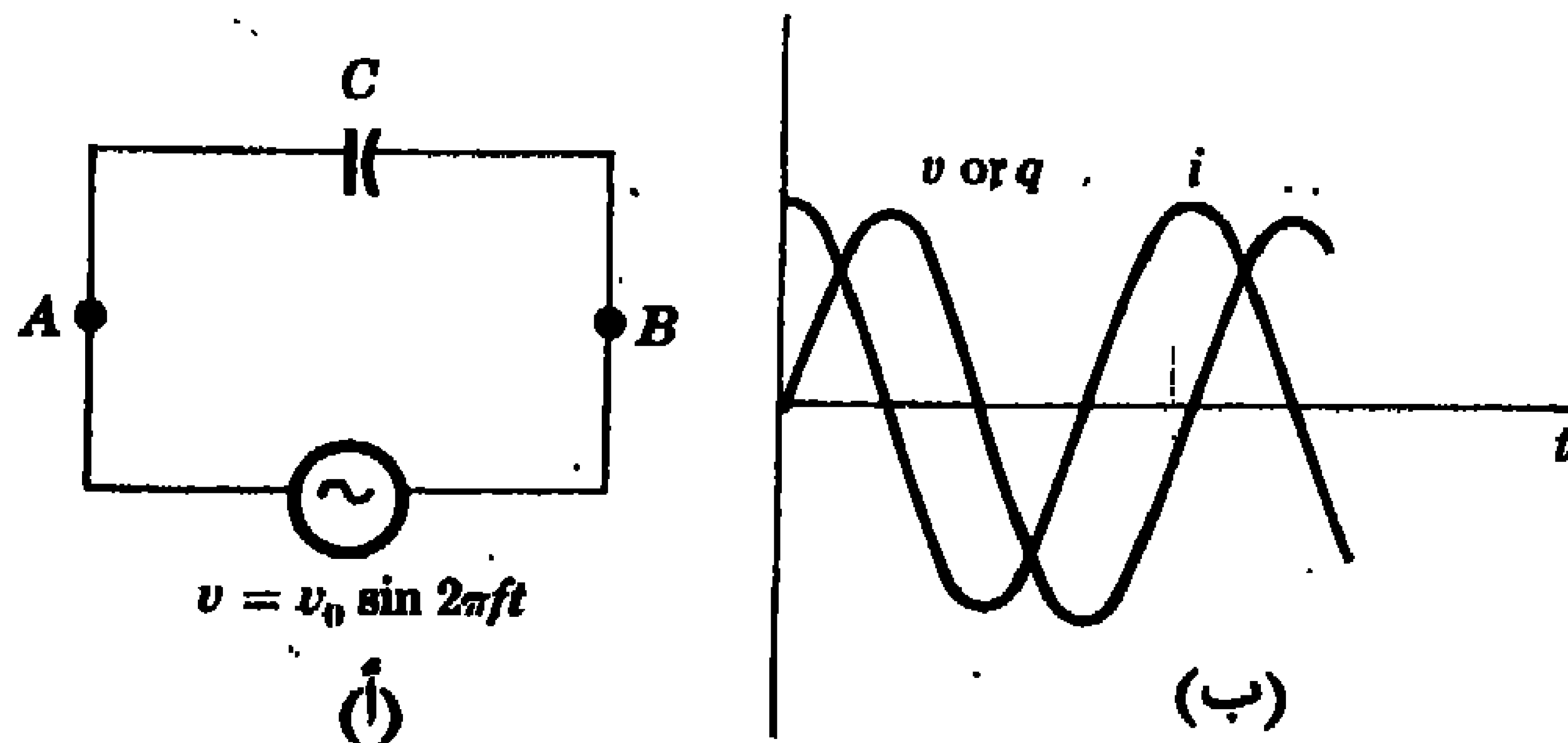
حددنا فى القسم السابق أن فقد الطاقة فى المقاوم هو I^2R ، وفى هذه الحالة الخاصة حيث لايوجد سوى المقاومة فان $I = V/R$ فإن فقد الطاقة يمكن كتابته على صورة أخرى وهى IV حيث I و V هما قراءتا (rms) لأجهزة القياس . سنرى فى الأقسام التالية أنه لايوجد متوسط لفقد الطاقة فى مكثفات أو محاثات، نقية . كل فقد الطاقة فى دوائر ac البسيطة يحدث فى المقاومات.

٢١ – ٤ دائرة السعة

لنعتبر الآن دائرة السعة المبينة فى الشكل ٢١ – ٤أ . نعلم أن فرق الجهد من A إلى B يساوى جهد مصدر التيار المتردد $v_0 \sin 2\pi ft$. ولكننا نذكر أن فرق الجهد عبر مكثف يعطى بالعلاقة q/C ومن ثم يصبح لدينا

$$\frac{q}{C} = v_0 \sin 2\pi ft$$

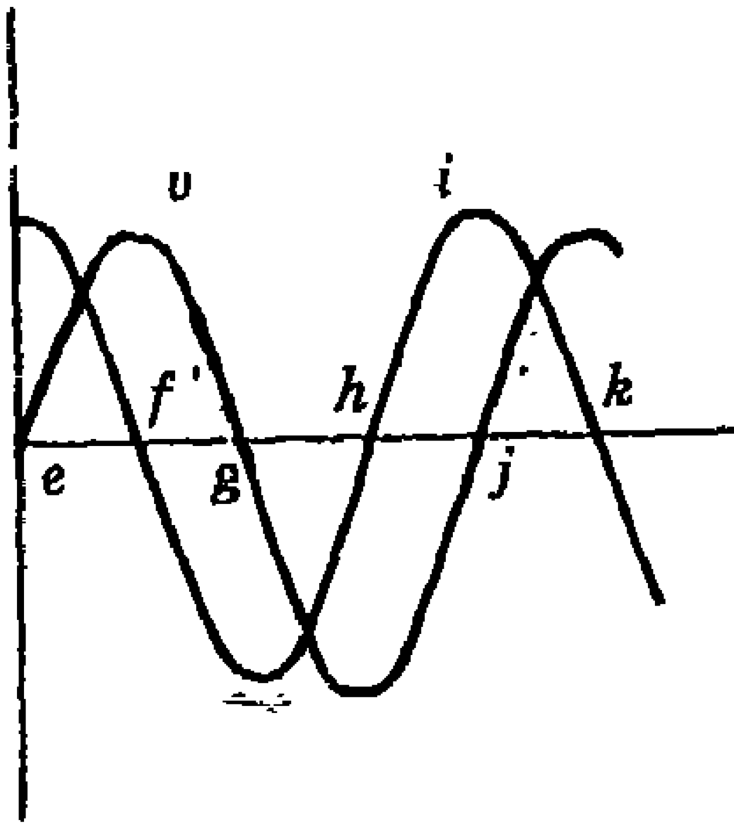
وحيث أن C مقدار ثابت ، لذا فالشحنة على المكثف سوف تتذبذب قيمتها بنفس الطريقة كجهد المصدر ، فحين يكون جهد المصدر موجبا ، يشحن المكثف بشحنة موجبة . وحين يكون سالبا ، يشحن المكثف بشحنة سالبة . علاوة على ذلك ، تصل الشحنة إلى قيمتها العظمى فى نفس الوقت الذى يصير فيه الجهد عند قيمته العظمى . وعلى هذا فإن منحنى الجهد مقابل الزمن سيبدو هو نفسه منحنى الشحنة مقابل الزمن كما هو واضح من الشكل ٢١ – ٤ب .



شكل ٢١ – ٤
يصل فرق الجهد بين طرفى المكثف إلى القيمة العظمى متأخرا عن التيار بمقدار ربع دورة ويكون كل من فرق الجهد والشحنة على المكثف متطاورا .

لكى نرى كيف يتغير التيار مع الزمن لنتذكر أن التيار هو معدل تغير الشحنة على المكثف $\frac{\Delta q}{\Delta t}$. ولكن الكمية $\frac{\Delta q}{\Delta t}$ ليست إلا ميل* المنحنى الذى ينتج من رسم q مقابل الزمن t . هذا المنحنى مبين فى الشكل ٢١ – ٤ ب . وماعلينا إلا أن نرسم ميله وبذا نحصل على منحنى التيار المار فى الدائرة . وهذا مايوضحه المنحنى الأسود فى شكل ٢١ – ٤ ب .

لاحظ الآن ، أن التيار لايساير فرق الجهد خطوة بخطوة ، فحين يكون التيار عند قيمته العظمى عند $t = 0$ ، فإن فرق الجهد لايصل إلى قيمته العظمى إلا متأخرا بمقدار ربع دورة . لذا يقال هنا أن التيار يتقدم فرق الجهد بمقدار $90°$ أو $\frac{1}{4}$ دورة فى مثل تلك الدائرة السعوية . وسنرى الآن ماذا يعنى هذا بالنسبة للطاقة المبددة فى الدائرة .



شكل ٢١ – ٥
يقوم المكثف بسحب طاقة من مصدر الجهد خلال الفترات ef ، gh ، jk بينما يقوم خلال fg ، hj بدفع الطاقة مرة أخرى إلى مصدر الجهد .

خلال الفترة الزمنية من e إلى f فى شكل ٢١ – ٥ ، فإن التيار يخرج من الطرف الموجب لمصدر الطاقة (وذلك لأن كلا من v ، i موجبان) ، وعلى هذا فالمصدر يقوم بتوفير قدرة للدائرة . ولكن خلال الفترة fg من الدورة فإن التيار يسرى فعليا فى اتجاه ضد مايود المصدر له أن يسرى فيه . أى أن المصدر يكون فى حالة شحن بدلا من أن يكون فى حالة تفريغ . فى الجزء gh من الدورة يقوم المصدر مرة أخرى بتوفير القدرة ، أما فى الجزء hj فإنه يشحن مرة أخرى .

من الواضح فى هذه الدائرة أن مصدر الطاقة يشحن أى يغذى بالطاقة بنفس القدر الذى يفرغ فيه أى يعطى طاقة للدائرة ، أى أن متوسط القدرة المسحوبة من المصدر صفر ومن هنا نرى أن المكثف ، على عكس المقاوم ، لايستهلك طاقة . فالطاقة تختزن فى المكثف بواسطة المصدر لجزء من الدورة ولكن المكثف يعيد هذه الطاقة إلى المصدر أثناء تفريغه . ولعلك تذكر أننا بينا فى الفصل السابع عشر أن المكثف يقوم بتخزين الطاقة وأن كمية الطاقة المختزنة هى $\frac{1}{2}QV$

من الشيق أيضا أن نرى كيف يتصرف المكثف حين يتغير تردد المصدر . عند الترددات المنخفضة يمر تيار ضئيل جدا فى الدائرة ، وعندما يكون التردد صفرا ، أى ظروف تيار مستمر (dc) ، فإن التيار يكون دائما صفرا إلا فى اللحظة الأولى حين يشحن المكثف . لو أن تردد المصدر كان ، على سبيل المثال 1 cps ، فإن المكثف سيشحن ويفرغ مرة واحدة كل ثانية ويمر بعض التيار ولكن ليس كثيرا .

---

* ميل المنحنى هو بالضبط ماتعنيه الكلمة ، إذ أنه المعدل الذى يرتفع به المنحنى . فلو كان المنحنى مسطحا وأفقيا أى أنه لايرتفع على الإطلاق ، لكان ميله صفراً . أما لو كان المنحنى يرتفع بسرعة فإن ميله يكون كبيرا . لو كان المنحنى ينخفض أى يهبط إلى أسفل فهو فى الواقع يرتفع بمعدل سالب ولذا يكون ميله سالبا .

ولكن إذا كان التردد مليون دورة فى الثانية ، فإن المكثف سيشحن ويفرغ مليون مرة فى ثانية واحدة ، ولما كان التيار هو معدل تغير الشحنة ، لذا فالتيار إلآن سيكون كبيرا لأن الشحنة تتغير بسرعة .

نتيجة لهذا فإننا نرى أن المكثف يجعل التيار صغيرا إلى أقصى حد فى دائرة كالتى فى الشكل ٢١ – ٤أ حين يكون التردد منخفضا . ومن ناحية أخرى لايعوق سريان التيار عند الترددات المرتفعة ، أى أن المكثف يعمل كمقاومة كبيرة عند الترددات المنخفضة وكمقاومة صغيرة عند الترددات المرتفعة ، ولكنه لايسبب أى فقد فى الطاقة نتيجة للتسخين . وقد كنا نود أن نتحدث عن « مقاومة » المكثف لولا الخوف من أن تؤدى هذه الكلمة إلى اللبس ، وعلى هذا سنرمز إلى مقدرة المكثف على اعاقة سريان التيار على أنها **مفاعلته** . يمكن باستخدام حساب التفاضل والتكامل إثبات أن مفاعلة المكثف ترتبط بجذر متوسط مربع التيار (rms) والجهد بعلاقة من طراز قانون أوم ، أى

شكل قانون اوم للمكثف

$$V = IX_C \qquad (٢١ - ١)$$

حيث X_C هى مفاعلة المكثف بوحدات ohm وتعطى بالمعادلة ،

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

تعتبر المعادلة التى تعطى مفاعلة المكثف (أو المفاعلة السعوية) منطقية ، فحين يكون التردد f صغيرا أو حين تكون سعة المكثف صغيرة فإن X_c ستكون كبيرة . وكما ألمحنا سابقا ستكون X_c صغيرة حين يكون التردد كبيرا .

مثال توضيحى ٢١ – ٢ افترض أنه فى الدائرة التى فى شكل ٢١ – ٤ كان $C = 0.4\ \mu F$ وأن $v = 100 \sin (2\pi ft)$ وكانت $f = 20$ Hz اوجد تيار (rms) فى الدائرة . كرر بالنسبة للتردد $f = 2 \times 10^6$ Hz (تردد خط القدرة العادى 60 Hz) .

طريقة الحل : نعرف أن $V = IX_C$ حيث V و I هما قيم (rms) ، وحيث أن $V = 0.707\ v_0$ ، وحيث أن $v_0 = 100$ V لذا نجد أن $V = 70.7$ V ولكن $X_C = 1/2\pi fC$ بالتعويض عن $f = 20$ Hz و $C = 0.4 \times 10^{-6}$ F نجد أن $X_C = 19{,}900\ \Omega$ وعلى هذا ،

$$I = \frac{V}{X_C} = 0.0036\ \text{A}$$

عند تردد يبلغ 2×10^{6}Hz فإن نفس الخطوات السابقة تؤدى إلى ،.

$$I = 355\ \text{A} \quad \text{و} \quad X_C = 0.199\ \Omega$$

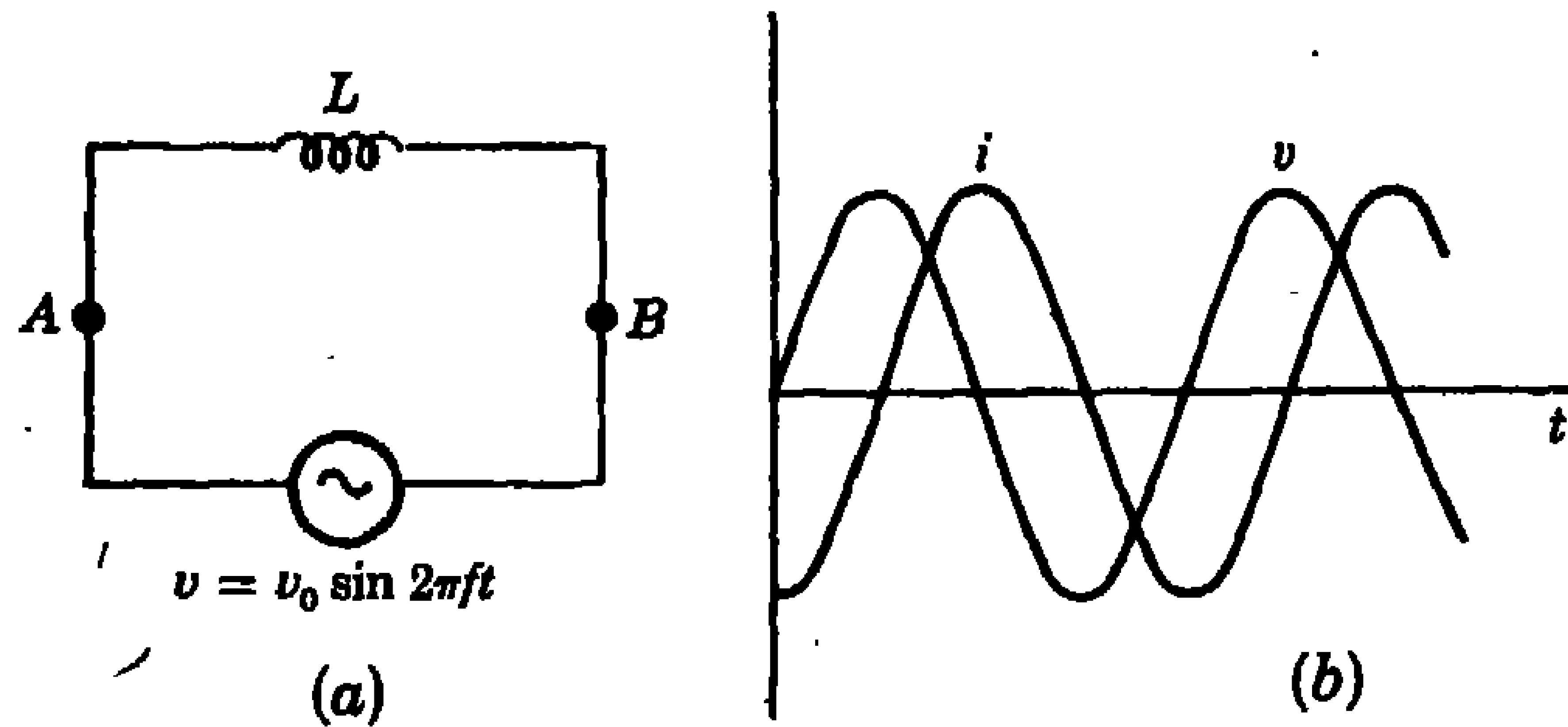
لاحظ أن ما قلناه من قبل صحيح تماما ، فعند الترددات المرتفعة تعاوق السعة التيار بأقل مما تفعل عند الترددات المنخفضة .

٢١ - ٥ دائرة المحاثة

يمكن معالجة سلوك دائرة المحاثة الذاتية البسيطة المبينة فى شكل ٢١ - ٦أ بنفس الطريقة التى استعملت لدائرة السعة* . نلاحظ أولا أن فرق الجهد بين النقطتين A ، B مساور لجهد المصدر $v_0 \sin 2\pi ft$ ، على أنه مساو أيضا للجهد المستحث فى المحاثة نتيجة للتيار والتدفق المتغير فى الدائرة . وقد رأينا فى الفصل السابق أن هذا الجهد يساوى $L\,\Delta i/\Delta t$ بمساواة هاتين القيمتين ينتج أن

$$v_0 \sin 2\pi ft = L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

حيث أن L مقدار ثابت فإننا نرى على الفور ان جهد المصدر يتناسب طرديا مع معدل تغير التيار المار فى الدائرة ، ولكن معدل تغير التيار هو ميل منحنى العلاقة بين التيار والزمن ، وعلى هذا يكون لدينا طريقة لإيجاد أحد المنحنيين إذا علم المنحنى الآخر . يبين الشكل ٢١ - ٦ب منحنيات فرق الجهد والتيار فى دائرة محاثة . لاحظ أن منحنى فرق الجهد يتناسب بالفعل مع قيمة ميل منحنى التيار .



شكل ٢١ - ٦
يتقدم فرق الجهد عبر المحاثة التيار المار خلالها بمقدار 90° أو ربع دورة . لاحظ الرمز المستخدم للمحاثة .

*لاحظ ان الرمز ⌇⌇⌇ قد استعمل للدلالة على ملف المحاثة .

هنا أيضا يكون التيار وفرق الجهد متفاوتين فى الطور بمقدار °90 على أن فرق الجهد هنا يكون أمام التيار بزاوية °90 ويقال أن فرق الجهد يتقدم التيار بمقدار °90 فى هذه الحالة .

يمكننا مرة أخرى استعمال نفس طريقة التفكير كما فعلنا فى القسم السابق لنبين أن ملف المحاثة لايستهلك أية طاقة فى المتوسط . فعلى الرغم من أن المصدر يختزن الطاقة فى ملف المحاثة خلال جزء من الدورة إلا أن الملف يعيدها إليه مرة ثانية خلال الجزء التالى من الدورة . وليس من العسير بيان أن الطاقة المختزنة فى ملف المحاثة هى $\frac{1}{2}Li^2$. وإنك لتحسن صنعا إذا فحصت الشكل ٢١ — ٦ب وتأكدت من الجزء الذى يقوم فيه المصدر بفقد طاقة والجزء الذى تعود فيه الطاقة إليه .

يعتبر السلوك العام لدائرة المحاثة ذا أهمية أيضا عند تغير تردد المصدر ، فنحن نعرف ، بالطبع ، أن ملف المحاثة سيحاول دائما معادلة أو معاوقة التغير فى التيار . وفى الحقيقة تكون ق . د . ك المنتجة بالحث بداخله هى $-L\frac{\Delta i}{\Delta t}$ ، وهى تتناسب مع معدل تغير التيار . نتيجة لهذا ، حين يتغير التيار ببطء شديد فإن الأثر فى ملف المحاثة لن يكون كبيرا ، ولكن عند الترددات المرتفعة ، حين يحاول التيار أن يتغير بسرعة ، فإن الأثر المعاوق للملف المحاثة يكون كبيرا جدا ويسمى هذا الأثر المعاوق المفاعلة الحثية X_L .

ترتبط المفاعلة الحثية X_L مع قيم (rms) للتيار المار فيها وفرق الجهد عبرها

شكل قانون اوم للمحاثة

$$V = IX_L \qquad (٢١ - ٢)$$

حيث $X_L = 2\pi fL$ هى المفاعلة الحثية وكما توقعنا تكون مفاعلة ملف المحاثة كبيرة عند الترددات المرتفعة وصغيرة عند الترددات المنخفضة . كما أنها تقاس بوحدات الأوم ohm .

لاحظ أن المكثفات وملفات المحاثة تتصرف عكس بعضها البعض بالنسبة للتردد . فأثر المكثفات المعاوق للتيار يكون كبيرا عند الترددات المنخفضة وصغيرا عند الترددات المرتفعة . والعكس هو الصحيح فى حالة ملفات المحاثة . ومن الطبيعى أن الأثر المعاوق للمقاون لايعتمد على التردد .

مثال توضيحى ٢١ — ٣ افترض أن ملف المحاثة فى شكل ٢١ — ٦ قيمته 15 mH ، أما جهد المصدر كما تبينه قراءة جهاز قياس ac فهو 4ov ، بينما تردده 60 Hz اوجد التيار الذى يسرى به . كرر بالنسبة لتردد 6×10^5 Hz

طريقة الحل : تستخدم الصورة الآتية لقانون أوم $V = IX_L$ فى حالة تردد 60 Hz وجهد $V = 40$ V

$$X_L = 2\pi fL = 5.65\ \Omega$$

عندئذ $I = 40\ \text{V}/5.65\ \Omega = 7.1$ A

عند تردد مقداره 6×10^5 Hz ، تصبح قيمة $X_L = 5.7\times10^4\ \Omega$ ومنها نجد أن $I = 7.1\times10^{-4}$A . لاحظ إلى أى مدى ازداد أثر معاوقة ملف المحاثة عند الترددات المرتفعة إذا قورن بقيمته عند التردد المنخفض .

٢١ – ٦ دائرة LCR مجتمعة

سنناقش باختصار الدائرة المتصلة على التوالى والمبينة فى شكل ٢١ – ٧أ والتى تحتوى على العناصر الثلاثة السابق مناقشتها فى الأقسام السابقة . يكون قانون أوم المكافىء بالنسبة لهذه الدائرة هو

$$V = IZ \qquad (٢١ - ٣)$$

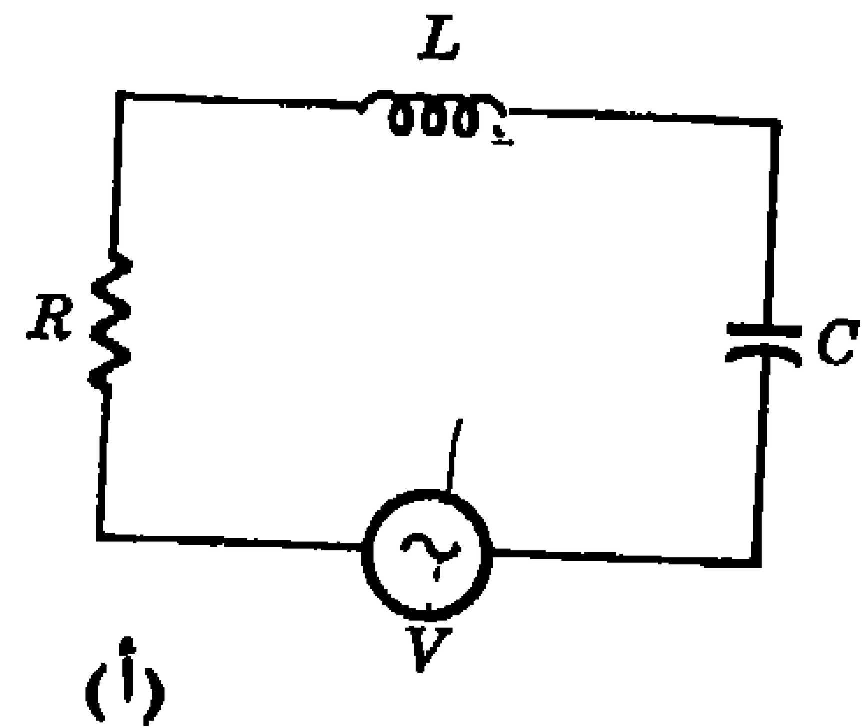
حيث

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

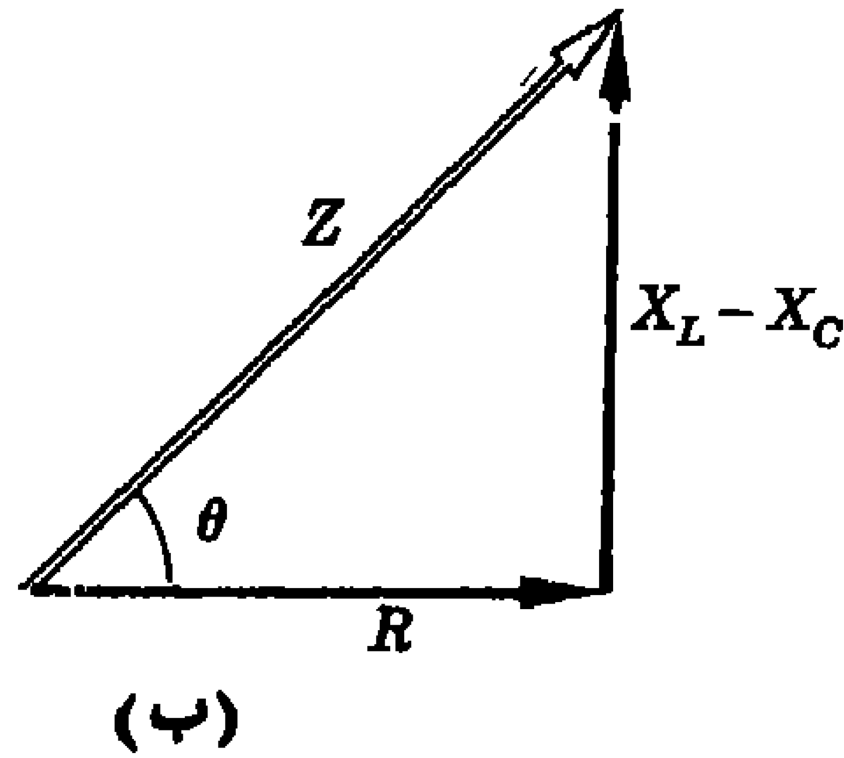
شكل قانون اوم لمتسلسلة دائرة RCL

تسمى الكمية Z **معاوقة** الدائرة ووحداتها هى الأوم . من السهل ملاحظة أن المعادلة (٢١ – ٣) تختصر إلى الصور المعطاة فى الاقسام السابقة فى حالة وجود عنصر معاوق واحد وتكون باقى العناصر صفرا .

لايكون التيار المار فى الدائرة التى فى شكل ٢١ – ٧أ متطاورا مع فرق الجهد دائما ، فمن الممكن إيجاد الزاوية θ بين التيار وفرق الجهد بواسطة مخطط بيان المتجهات الموضح فى شكل ٢١ – ٧ب . لو أن X_C و R كانوا صفرا ، فإن $\theta = 90°$ ، أى أن التيار وفرق الجهد يتفاوتان فى الطور بمقدار 90° ، كما رأينا فى القسم السابق . عليك بإقناع نفسك بأن مخطط بيان المتجهات يعطى القيمة الصحيحة للزاوية θ حينما يكون كل من X_L و X_C صفرا .



(أ)



(ب)

شكل ٢١ – ٧
بما أن معاوقة الدائرة المرسومة فى (أ) هى :
$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ،
فمن الممكن تصور Z على أنها وتر المثلث قائم الزاوية المبين فى (ب) . والزاوية θ هى فرق الطور بين التيار وفرق الجهد .

القدرة المستهلكة فى الدائرة الموضحة فى الشكل ٢١ – ٧ هى I^2R ، وهذه نتيجة لمناقشتنا السابقة من أن فقد الطاقة يكون صفرا فى حالة ملف محاثة أو مكثف نقيين ، ولما كان فرق الجهد عبر المقاوم لايكون عادة هو نفسه جهد المصدر ، لذا يصبح واضحا أن فقد الطاقة فى الدائرة لايمكن أن يساوى VI كما تحدث فى دوائر التيار المستمر dc . ويتضح أن التعبير الصحيح لفقد الطاقة هو

فقد الطاقة فى دائرة AC

$$\text{القدرة} = VI\cos\theta \qquad (٢١ - ٤)$$

هو حيث θ هى زاوية الطور بين فرق الجهد والتيار كما هو مبين فى الشكل ٢١ – ٧ب . العامل $\cos\theta$ يسمى دائما **عامل القدرة** . لاحظ أن $\theta = 0$ فى دائرة مقاومة نقية ، ويكون عامل القدرة بالنسبة للمقاوم مساوياً الوحدة ، بينما لمكثف او ملف محاثه نقيين يكون عامل القدرة صفرا . لماذا ؟

مثال توضيحى ٢١ – ٤ افترض أن مصدر الجهد فى الشكل ٢١ – ٧أ كانت قيمة (rms) له هى **50V** وكان التردد **600 Hz** . افترض ايضا أن $R = 20\ \Omega$، $C = 10.0\ \mu F$، $L = 4.0\ mH$.

اوجد (أ) التيار المار فى الدائرة و (ب) قراءات الفولتميتر عبر R ، C ، L كل على حدة .

طريقة الحل : سنستخدم العلاقة $V = IZ$ ونوجد بناء على ذلك X_L و X_C عند التردد **600 Hz** . لدينا ،

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = 26.5\ \Omega \qquad \text{و} \qquad X_L = 2\pi fL = 15.1\ \Omega$$

وبعد ذلك نجد أن

$$Z = \sqrt{(20)^2 + (15.1 - 26.5)^2} = 23.0\ \Omega$$

والآن باستعمال $I = V/Z$ نجد أن $I = 2.17\ A$.

لإيجاد فرق الجهد عبر R ، نستعمل $V_R = IR$ وبمعرفة أن $I = 2.17\ A$ فإن

$$V_R = 43.4\ V$$

أما فرق الجهد عبر ملف المحاثة فيعطى بالعلاقة $V_L = IX_L$

$$V_L = (2.17)(15.1) = 32.8\ V$$

وبالمثل ، نجد أن

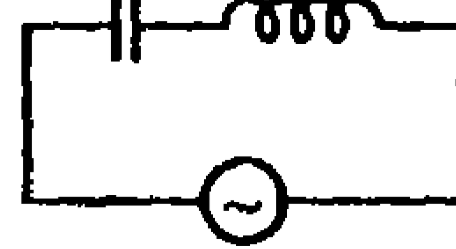
$$V_C = IX_C = 57.5 \text{ V}$$

لاحظ أن فرق الجهد عبر المكثف أكبر من جهد المصدر وهذا يشير إلى سمة خاصة لدوائر التيار المتردد (ac) وهو أن مجموع قراءات الفولتميتر حول دائرة مغلقة لايكون صفرا ، وفروق الجهد لاتجمع بشكل صحيح إذا استعملت قراءات (rms) للجهود . هذه الحقيقة هى نتيجة للطبيعة المتوسطية لقراءات (rms) ، فهذه القراءات لاتمثل القيم اللحظية للجهود التى يمكن أن تكون موجبة أو سالبة . والجهود اللحظية هى التى يمكن جمعها بشكل صحيح ، أما جهود (rms) فهى دائما موجبة حسب التعريف . من الواضح ، إذن ، أن حاصل جمعها لايمكن أن يعطى صفرا وعلى هذا لايمكن تطبيق قاعدة العروة لكيرتشوف على هذه القيم .

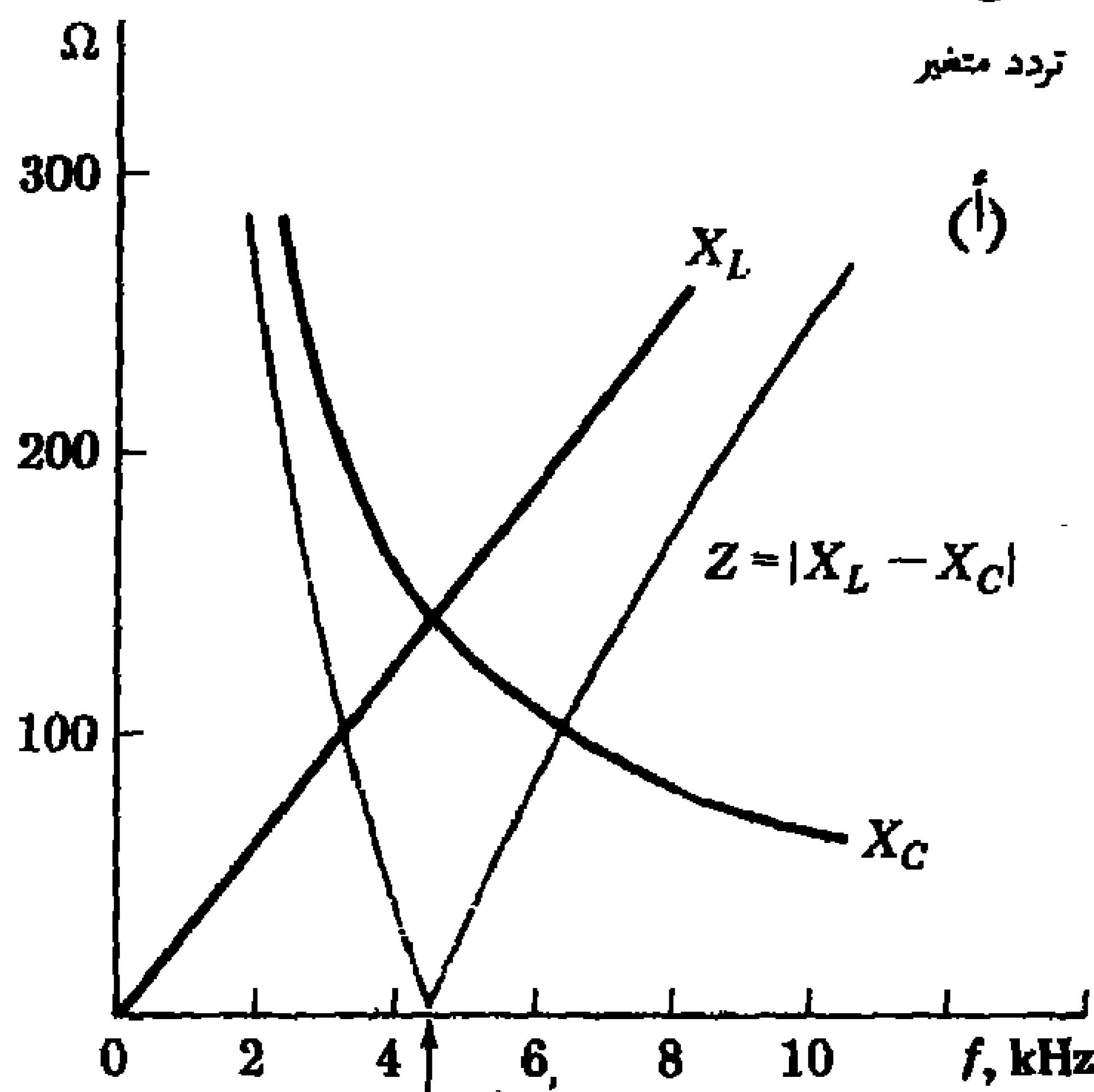
٢١ - ٧ الرنين الكهربائى

لدوائر Ac التى تحتوى على سعة ومحاثة ظاهرة رنين هامة . ولبيان هذه الحقيقة ، اعتبر دائرة التوالى الموضحة فى الشكل ٢١ - ٨أ . نعلم أن التيار فى هذه الدائرة التى لامقاومة فيها يعطى بالمعادلة ،

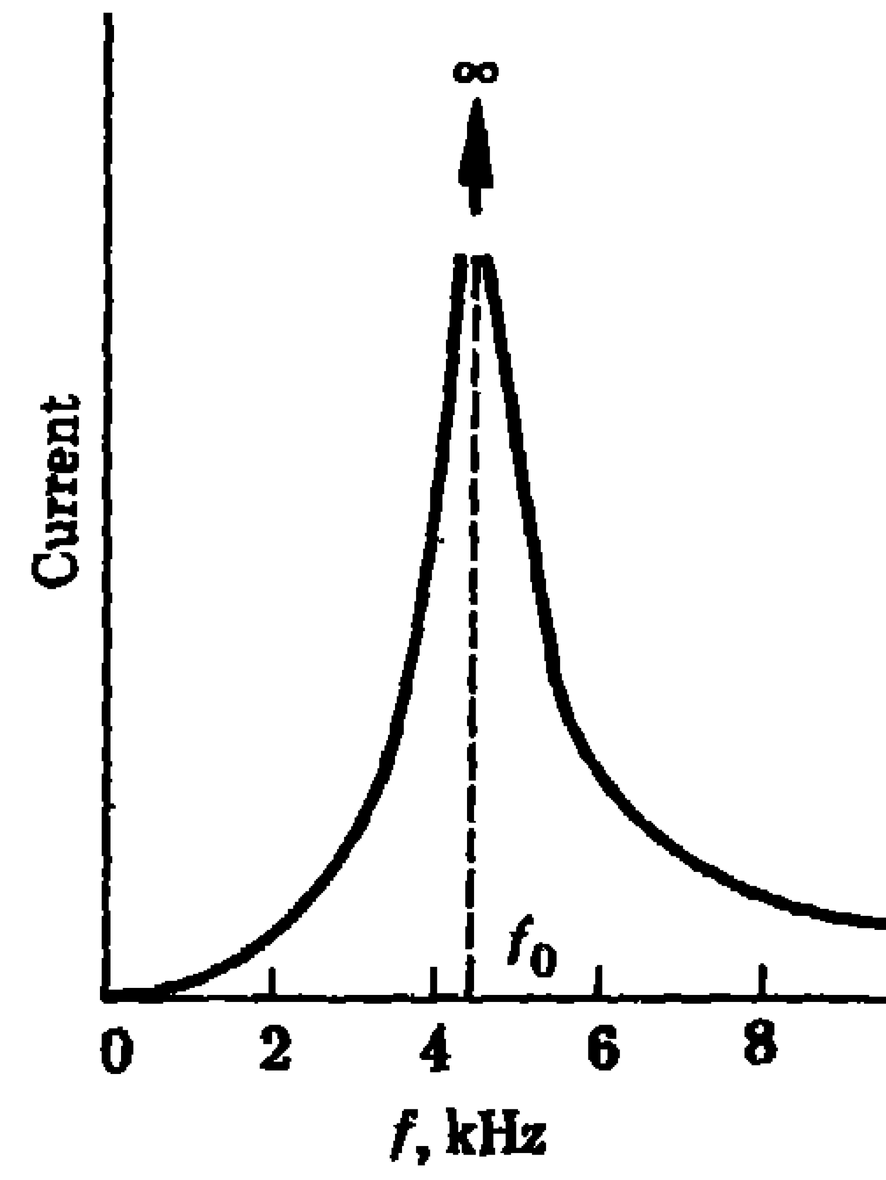
$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{X_L - X_C}$$



(أ)



(ب)



(حـ)

شكل ٢١ - ٨
عندما يتغير تردد المصدر فى (أ) فإن كلا من X_L ، X_C يتغير كما فى (ب) ويتغير تيار الدائرة كما فى (حـ)

لاحظ أنه عندما $X_C = X_L$ فإن التيار فى الدائرة يجب أن يصبح لانهائيا

تردد رنين LC

من السهل تحقيق الشرط $X_L - X_C = 0$ وذلك لان X_L تتزايد مع التردد بينما تتضاءل X_C مع التردد . يبين الشكل ٢١ – ٨ب كيف تتغير هذه الكميات مع قيم C و L المعطاة فى هذه الدائرة . فالمعاوقة تصبح صفرا عند $f = 4500$ Hz فى هذه الحالة . وهذا التردد وهو التردد الذى يصبح عنده $X_C = X_L$ يسمى **تردد الرنين** ويرمز له بالرمز f_0 . حيث أن $X_L = 2\pi fL$ و $X_C = 1/2\pi fC$ فإننا نجد عند الرنين أن

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

ومنها نجد أن تردد الرنين هو

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (٢١ - ٥)$$

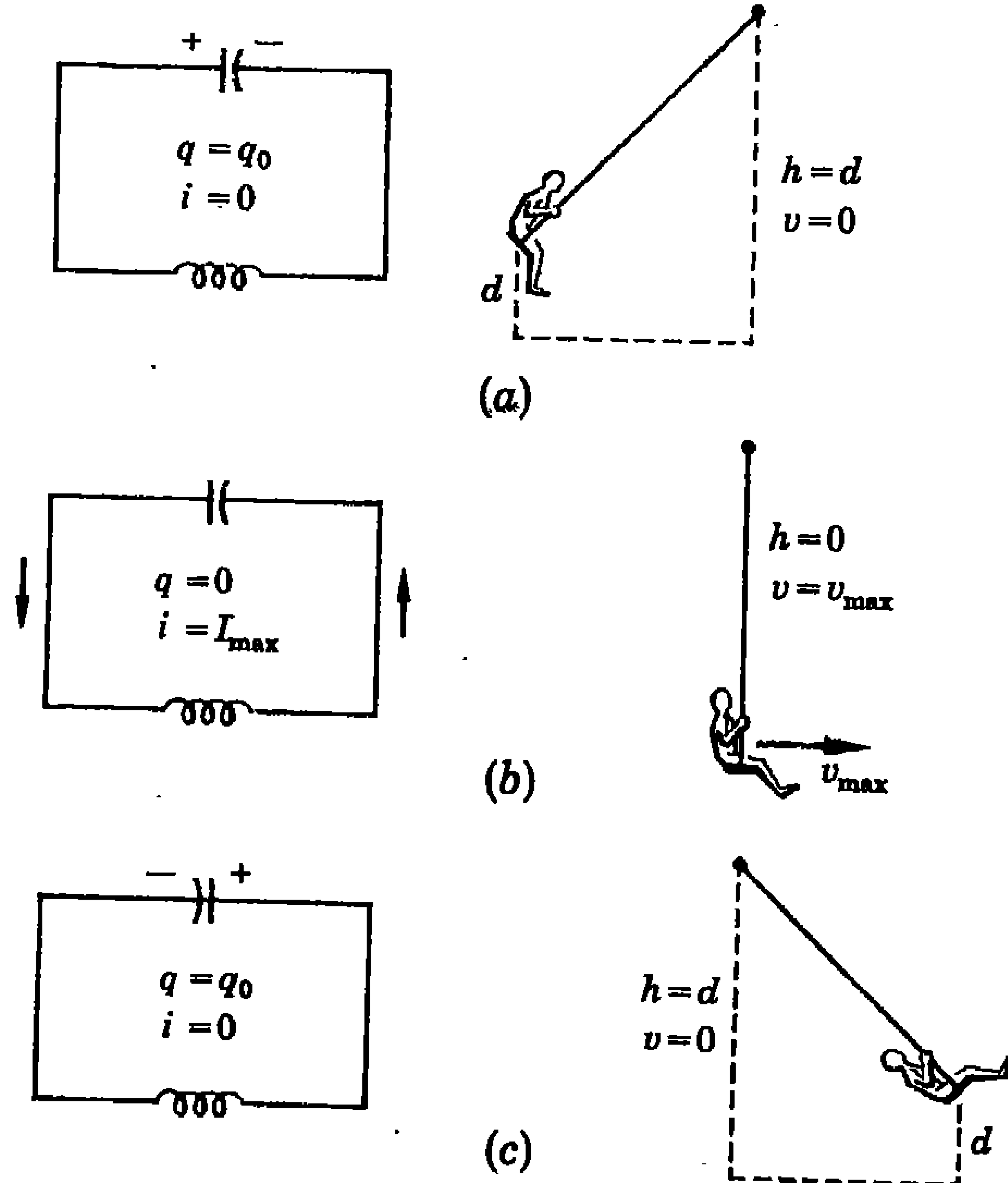
يبين الشكل ٢١ – ٨ حـ كيف يتغير تيار هذه الدائرة كلما تغير تردد المذبذب (من الطبيعى أن جهد المذبذب يجب أن يحفظ ثابتا لجميع الترددات) . كما هو واضح فإن التيار يبلغ الذروة بشكل حاد عند تردد الرنين ، وفى الدوائر العملية تكون ذروة التيار ذات قيمة محددة وليست لانهائية لأن أسلاك الدائرة لها بعض المقاومة . وحتى مع هذا فإن التأثير هائل جدا وله تطبيقات كثيرة وهامة كما سترى فى الفصل القادم .

نستطيع فهم الرنين الكهربائى بطريقة أفضل لو أننا أدركنا أنه يشبه كثيرا الرنين الميكانيكى . فأنت تعرف أن الأنظمة الميكانيكية يكون لها دائما تردد طبيعى تهتز عنده . وإذا دفعت بهذا التردد فإنها تهتز بعنف ، أى أنها ترن .

والدائرة LC البسيطة لها أيضا تردد طبيعى للاهتزاز ولنحاول استكشاف هذا التشابه بين الرنين فى الأنظمة الكهربائية والميكانيكية اعتبر دائرةLCوطفل على أرجوحة كما هو مبين فى الشكل ٢١ – ٩ . افترض أنه عند البداية كان التيار فى الدائرة صفرا بينما كان الطفل فى أعلى وضع للأرجوحة . اذا كانت الشحنة على المكثف هى q_0 فإن الطاقة المختزنة فيه ستكون $\frac{1}{2}(q_0^2/C)$. وبالمثل يكون للطفل على الأرجوحة طاقة وضع الجاذبية .

نحن نعلم أنه فى النظام الكهربائى سيقوم المكثف بالبدء فى التفريغ خلال ملف المحاثة وسيرتفع التيار ببطء – إلى حد ما – لأن ملف المحاثة سيعاكس أى تغير فى التيار . أما الطفل الذى على الأرجوحة فسيقوم بالبدء فى اكتساب سرعة كلما تغلبت

قوى التسارع على القصور الذاتى لنظام الأرجوحة . أى أن كلا من الطفل والمكثف قد بدأ يفقد طاقة وضع . وعندما تصل الأرجوحة إلى أدنى نقطة فى المسار تكون طاقة الوضع قد تحولت تماما إلى طاقة حركة . وبالمثل بالنسبة للدائرة ، فعندما يفقد المكثف كل شحنته ، فإن التيار يمر بشدة فى الدائرة وتختزن الطاقة الأصلية فى ملف المحاثة بحيث تكون قيمتها $1/2Li^2$ والموقف مصور فى الجزء (ب) من الشكل ٢١ — ٩ .



شكل ٢١ — ٩
مثلما تتذبذب طاقة التأرجح بين طاقة وضع أو حركة فإن طاقة الدائرة تتناوب أيضا فى التخزين إما فى المكثف المشحون وإما فى ملف المحاثة الذى يحمل تيارا .

من الطبيعى أن طفل الأرجوحة لن يتوقف عند قاع المسار لأن القصور الذاتى للنظام سيجعله مستمرا فى الحركة حتى يستقر فى الوضع المبين فى (حـ) من الشكل ٢١ — ٩ . وهنا تكون كل طاقته قد أصبحت طاقة وضع مرة أخرى . ونفس الشىء يحدث فى الدائرة الكهربائية ، فالمحاثة لها نوع من القصور الذاتى ولذا فهى تعاكس أى تغيير فى التيار فلا يتوقف مرة واحدة ولكنه يستغرق وقتا حتى يتوقف فى النهاية حين يصير المكثف مشحونا تماما ، مرة أخرى كما فى الجزء (حـ) وتتكرر هذه العمليات مرات ومرات عديدة .

من الواضح ، إذن ، أن الدائرة الكهربائية تقوم بعملية تبادل للطاقة مثلما يحدث فى حالة الطفل والأرجوحة ، فطاقة الطفل ستتناوب بين طاقة وضع وحركة بينما تتناوب الطاقة فى الدائرة فى التخزين إما فى المكثف أو الملف . كلا النظامين سيتذبذب جيئة

وذهابا إلى الأبد مالم يكن هناك فقد فى الطاقة . فى حالة الأرجوحة تؤدى قوى الاحتكاك إلى اضمحلال الاهتزاز فى نهاية الأمر ، أما فى الحالة الكهربائية ، فإن تأثيرات المقاومة تتسبب فى فقد بعض الطاقة وبهذا تأخذ سعة الذبذبات فى الاضمحلال تدريجيا .

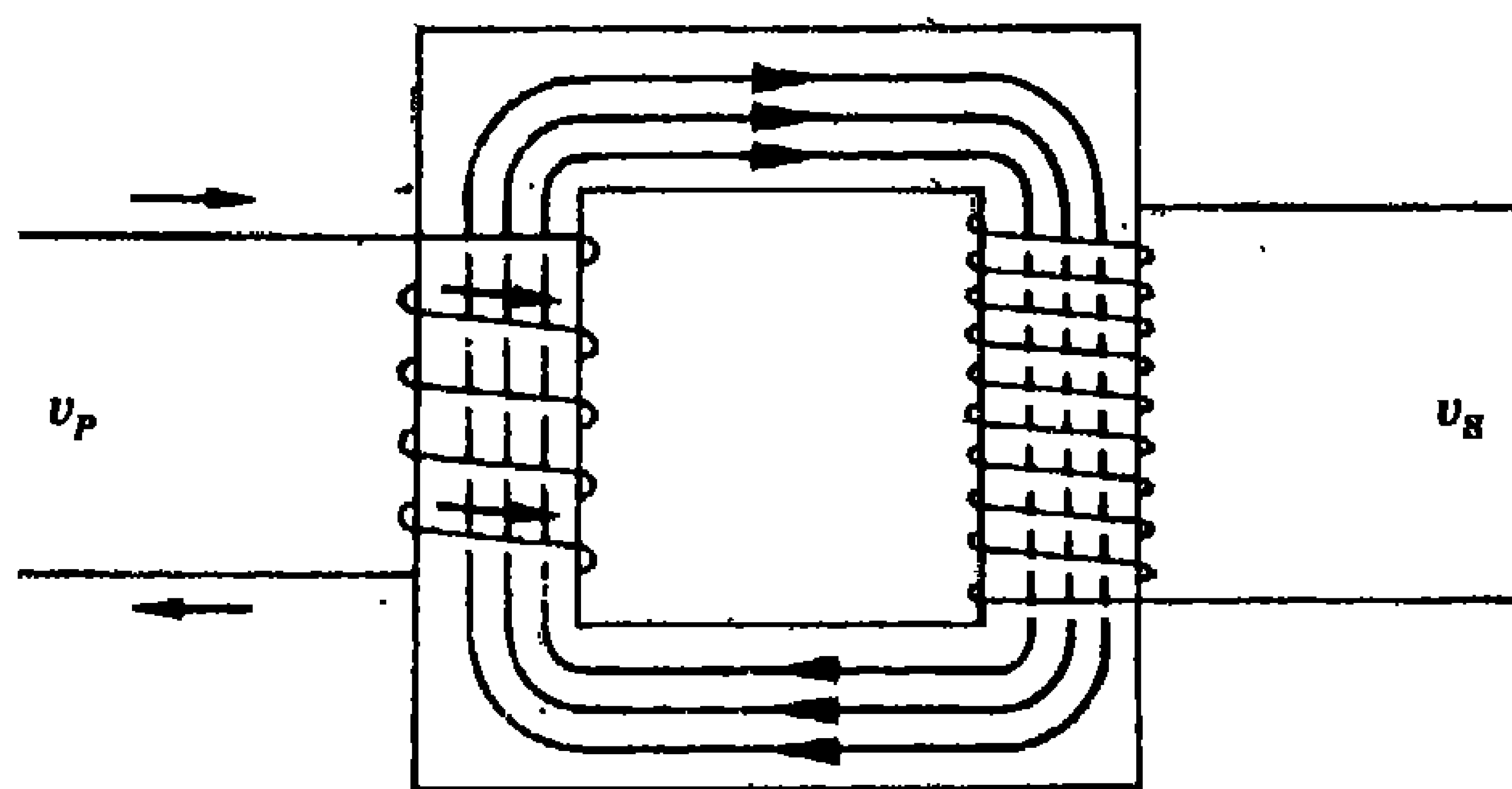
يمكننا التمادى فى دراسة اوجه الشبه ، فكل من الطفل والتيار لهما ترددات رنين طبيعية خاصة بحركتيهما . فالأرجوحة عبارة عن بندول ، سبق وأن حسبنا تردد ذبذباته الطبيعى فى فصل سابق . أما فى حالة الدائرة فتردد الرنين الطبيعى لها هو تردد الرنين الذى تم حسابه بالمعادلة (٢١ — ٥) .

إذا أردنا أن نجعل الطفل يتأرجح عاليا جدا فإنه يجب دفع الأرجوحة فى الوقت المناسب وبنفس التردد المساوى لتردد زنين الأرجوحة . ولقد رأينا أن تيارا شديدا يمكن أن يوجد فى دائرة LC إذا قام المذبذب « بدفع الدائرة عند تردد رنينها . وهكذا فإن سلوك الرنين فى النظامين متشابه تماما . سنرى فى الفصل القادم أن دائرة LC الرنانة تشكل جزءا متكاملا فى أى جهاز استقبال للراديو أو التليفزيون .

٢١ — ٨ المحول ونقل القدرة

المحول هو محاثة متبادلة صممت بحيث تحول جهدا مترددا (ac) إلى جهد آخر متردد أكبر منه أو أصغر . يتكون المحول من ملفين من السلك ملفوفين على مقرن يشبه الى حد ما النظام المبين فى شكل ٢١ — ١٠ . يوجد جهد متردد v_p عبر طرفى الملف الابتدائى مما يسبب مرور تيار فى هذا الملف وهذا التيار بدوره ينشىء تدفقا فى الحديد كما هو مبين .

وحيث أن التدفق يتحرك وفق المقرن الحديدى لذا فهو يمر أيضا خلال الملف الآخر . ومن الطبيعى أن يتغير التدفق طول الوقت وذلك لأن v_p تتغير جيبيا . يستحث هذا التدفق المتغير ق . د . ك جيبية قيمتها v_s فى الملف الثانوى .



شكل ٢١ — ١٠
محول رفع ذو قلب حديدى

لمعظم المحولات مقاومة ضئيلة جدا فى أسلاكها ولهذا فإن التيار خلال الملف الابتدائى لايجد مايعوقه سوى محاثة الملف نفسه . ولقد ناقشنا سلوك دائرة تحتوى على ملف محاثه متصل مباشرة مع مصدر جهد متردد بالتفصيل فى القسم ٢١ — ٥ ، فلتلك الدائرة قمنا بمساواة الجهد الحافز بالقوة الدافعة الكهربائية المنتجة بالحث فى ملف المحاثه . أما فى الحالة الراهنة فإن لدينا من قانون فارادای أن

$$v_P = N_P \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

حيث N_P هى عدد لفات الملف الابتدائى ، و $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ هو معدل تغير التدفق خلاله . ولكن حيث أن التدفق يتبع المقرن الحديدى لذا فكل التدفق سيذهب خلال الملف الثانوى أيضا وعليه تكون ق . د . ك المنتجة بالحث فى الثانوى هى :

$$v_S = N_S \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

بقسمة هذه المعادلة على معادلة الجهد عبر الملف الابتدائى ينتج أن

$$\frac{v_S}{v_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

على أن قيمة (rms) للجهد هى ببساطة $0.707v_0$ ، ولذا يمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بدلالة V_S و V_P

معادلة المحول　　(٢١ — ٦)

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

هذه هى معادلة المحول وتفيدنا عن كيفية ارتباط جهد الملف الثانوى بجهد الابتدائى . فالنسبة بين الجهدين كالنسبة بين عدد لفات الملفين ، وحين تكون N_S أكبر من N_P يكون V_S أكبر من V_P ويسمى المحول فى هذه الحالة **محول رفع** لأنه يؤدى إلى زيادة الجهد . أما فى عكس هذه الحالة يكون لدينا **محول خفض** .

حين لاتكون دائرة الملف الثانوى مغلقة فلا يمر تيار فيها ومن ثم لن يكون هناك فقد للطاقة فى الملف الثانوى حين لايكون قيد الاستعمال . وقد أشرنا من قبل فى القسم ٢١ — ٥ أنه لايوجد أيضا فقد فى الطاقة فى ملف محاثة عديم المقاومة . وهذه الحقيقة تتيح لشركات توزيع القوى أن تحتفظ بمحولاتها دائرة فى جميع أنحاء المدينة ، حتى فى حالة عدم استهلاك أحد للكهرباء التى يوزعونها ، فالمحولات نفسها تستهلك قدرا طفيفا جدا من الطاقة .

ولكن ، حين يسحب تيار من الملف الثانوى ، لتشغيل سخان مثلا ، فإن الطاقة تستهلك بواسطة السخان . وهذه الطاقة يجب أن يغذى بها الملف الابتدائى فى المحول حتى يقوم بنقلها إلى الملف الثانوى . أى أن فقد الطاقة فى الملف الثانوى – تحت هذه الظروف – يجعل الملف الابتدائى يبدو كما لو كانت له مقاومة محددة .

هناك العديد من استعمالات المحولات . أى جهاز راديو أو تليفزيون يعمل من خط قدرة لابد وأن يحتوى على واحد أو أكثر من المحولات . فمن الضرورى تحويل خط المنزل ذى الـ 120V إلى حوالى 5V لكى يمكن تشغيل المكونات الالكترونية . علاوة على ذلك ، تحتاج أنبوبة الصورة فى جهاز التليفزيون إلى جهد يبلغ 100 ضعف جهد الخط مما يستلزم استعمال محول .

هناك استعمال آخر للمحولات فى مجال نقل القدرة ، فكثير من شركات القوى تقوم بإمداد مدن قد تبعد 100 km عن المولدات بالقدرة الكهربية مما يشكل مشكلة حقيقية . افترض أن مدينة ما يسكنها 100,000 نسمة يستخدم كل منهم قدرة قيمتها 120 W مما يكافىء مصباحا أو اثنين مشتعلين لكل شخص وتكون القدرة المستهلكة هى W(100,000) (120) عند جهد يبلغ 120 V أو

القدرة الكلية = VI

$$120\, I = (120)(100{,}000)$$

$$I = 100{,}000\text{A}$$

حيث اعتبرنا عامل القدرة مساويا الوحدة .

حيث أن السلك المستخدم فى المنازل يمكنه بأمان أن يتحمل تيارا يبلغ فقط 30A بدون أن يحدث تسخين فوق ، لذا فشركة التوزيع سيلزمها مايكافىء 3000 من مثل هذا السلك لنقل القدرة إلى المدينة . وعلى الرغم من أن هذا ليس مستحيلا ، إلا أن تكلفة النحاس فقط تعتبر هائلة . على أن شركات القوى تقوم بالالتفاف حول هذه المشكلة بشكل جيد وذلك بمراعاة أن الكمية الهامة فى المشكلة هى VI وليست I بمفردها . لذا فهم يختارون أن ينقلوا القدرة لمسافات بعيدة عند جهود مرتفعة جدا . ففى المثال السابق لو أن $V = 100{,}000$ V فإنه يكون لدينا ،

$$(120)(100{,}000) = 100{,}000\, I$$

أو

$$I = 120\text{ A}$$

ولهذا السبب تستخدم شركات القوى خطوط الجهد العالى لنقل القدرة لمسافات كبيرة .

من الطبيعى أنه لن يجرؤ أحد على توصيل هذه الجهود العالية مباشرة إلى المنازل ، فخطر الصعق بالكهرباء وحدوث الحرائق سيكون رهيبا ، لذا فهم يستخدمون بدلا من هذا محولات خفض لتحول هذه الجهود العالية إلى الجهد المعتاد الذى يستخدم فى المنازل وهو فى الولايات المتحدة يبلغ 120 V .

يوجد فى كثير من المنازل خطوط ذات 240 V أيضا وذلك لأن الأجهزة المنزلية الضخمة مثل المكواة ، المجففات ، المواقد ، الخ ، تدار من خطوط 240 V بدلا من 120 V والسبب فى هذا هو نفسه الذى من اجله تلجأ الشركات الى استعمال الجهد العالى . عليك أن تشرح لماذا كان تشغيل هذه الأجهزة ذات الاستهلاك الضخم للطاقة من خط 240V بدلاً من 120V أكثر وفرا

ملخص

حين يقوم مصدر للتيار المستمر بشحن مكثف C خلال مقاوم مقاوم R فإن التيار يضمحل أسيًّا . هناك زمن مميز RC يسمى الثابت الزمنى وهو ذو أهمية ، فهو يقيس الزمن الذى يستغرقه المكثف لكى يشحن (أو يفرغ) بنسبة 63 فى المائة تقريبا . وخلال نفس هذا الوقت تهبط تيارات الشحن والتفريغ إلى مايقرب من 37 فى المائة من قيمها الأصلية .

القيمة المتوسطة لأى تيار أو جهد من النوع الجيبى تساوى صفرا . تقرأ أجهزة قياس التيار المتردد العادية $0.707 i_0 = i_0/\sqrt{2}$ و $v_0/\sqrt{2}$ حيث i_0 ، v_0 هى القيم الذروية . وتمثل قراءات تلك الأجهزة بالرمزين I ، V ، اللذين يطلق عليهما القيم الفعالة أو قيم (rms) . حين يطبق جهد متردد V عبر مقاوم R فإن العلاقة $V = IR$ تكون قائمة . بالنسبة لمكثف يوجد عبر طرفيه جهد متردد ذو تردد f فإن $V = IX_C$ حيث $X_C = 1/2\pi fC$. فى حالة ملف المحاثة L وبين طرفيه جهد متردد يكون لدينا $V = IX_L$ حيث $X_L = 2\pi fL$. تسمى الكيمات X_C ، X_L المفاعلة السعوية والمفاعلة الحثية .

تنطبق العلاقة $V = IZ$ فى دائرة على التوالى تحتوى على مصدر للتيار المتردد مع ملف محاثة ، ومكثف ومقاومة ، وتكون معاوقة الدائرة Z مساوية $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

لايستهلك المكثف النقى أو ملف المحاثة النقى فى المتوسط أية قدرة . ويكون استهلاك الطاقة مقصورا على المقاومات حيث يكون فقد الطاقة هو I^2R فى دائرة على التوالى تحتوى على L ، C ، R فإن فقد الطاقة يكون $VI\cos\theta$ حيث V هو الجهد المطبق ، أما الكمية cosQ فتسمى عامل القدرة . الزاوية θ تعطى بالعلاقة $\tan\theta = (X_L - X_C)/R$

ترن دائرة LC عند تردد يكون فيه $X_L = X_C$ ، وعند تردد الرنين $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{1/LC}$ يصبح التيار كبيرا جدا . وكلما قلت مقاومة الدائرة كلما زاد التيار عند الرنين .

تتكون المحولات من ملفين (أو أكثر) . يقوم التدفق الناشىء من الملف الإبتدائى بربط الملف الثانوى ، يرتبط الجهد فى الإبتدائى والجهد فى الثانوى بعدد العرى فى كل من الملفين حسب العلاقة $V_S/V_P = N_S/N_P$

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذه الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ — أن ترسم منحنيات التيار والشحنة لدائرة RC خلال الشحن وأن تعرف الثابت الزمنى للدائرة وتربط بينه وبين المنحنيات . أن تشرح مغزى الثابت الزمنى لتفريغ المكثف خلال مقاوم .

٢ – أن ترسم منحنى نموذجيا لجهد أو تيار مترددين . وأن توضح على الرسم القيم المتوسطة ، الذروية ، (rms) والفعالة . أن تربط بين قيمة (rms) والقيمة الذروية بطريقة كمية .

٣ – أن تذكر صورة قانون أوم التى تنطبق على جهد متردد مطبق على مقاوم . أن ترسم على نفس الرسم البيانى منحنيات التيار والجهد وأن تحسب متوسط فقد الطاقة فى المقاوم إذا توفرت لديك البيانات الكافية .

٤ – أن تشرح لماذا كان أثر معاوقة المكثف أكبر عند الترددات المنخفضة عنه عند المرتفعة . أن تستعمل العلاقة $V = IX_C$ فى مواقف بسيطة .

٥ – أن ترسم منحنيات التيار والجهد لمكثف متصل عبر مصدر قدرة مترددة . أن تذكر متوسط فقد الطاقة فى المكثف .

٦ – أن تشرح لماذا كان أثر معاوقة ملف الحاثة أكبر عند الترددات المرتفعة عنه عند المنخفضة . أن تستعمل العلاقة $V = IX_L$ فى مواقف بسيطة .

٧ – أن ترسم منحنيات التيار والجهد لملف حاثة متصل عبر مصدر للتيار المتردد . أن تذكر متوسط فقد الطاقة فى الملف .

٨ – أن تستعمل العلاقة $V = IZ$ فى مسائل بسيطة تتضمن دوائر RCL على التوالى .

٩ – أن تشرح – باستخدام $V = IZ$ لماذا يوجد تردد رنين لدائرة LC . أن توضح كيف تجد تردد الرنين .

١٠ – أن تشرح ماهو المحول وأن تذكر العلاقة التى تعطى النسبة V_S/V_P . أن تصف عدة استخدامات للمحولات .

مصطلحات وعبارات عامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

الثابت الزمنى RC

التيار أو الجهد المتردد

القيم المتوسطة (rms) والفعالة

$I = I_0/\sqrt{2};\ V = v_0/\sqrt{2}$

$P = I^2R;\ P = VI\cos\theta$ ، عامل القدرة

المقاومة ، المفاعلة السعوية ، المفاعلة الحثية

المعاوقة

$X_L = X_C$ عند الرنين ، تردد الرنين

محولات الخفض والرفع

أسئلة وتخمينات

١ – أعطيت مكثفا $2\text{-}\mu F$ ، خلية جافة ، جهاز فائق الحساسية ومتعدد الاستعمالات لقياس التيار . كيف تستخدم هذه الأشياء لقياس مقاومة مقاوم يظن أنه يقارب $10^8\ \Omega$ ؟ هل يمكنك القيام بنفس القياسات باستخدام فولتيتر عادى بدلا من جهاز قياس التيار ؟

٢ – يستعمل فى بعض الأماكن جهد متردد ذو تردد منخفض (أقل كثيرا من 60 cps) . ويمكن ملاحظة أن الأضواء الكهربائية ترتعش بسرعة حين تعمل عند هذا الجهد . اشرح سبب هذا الارتعاش .

٣ – اذكر لأى من هذه الاستخدامات يكون الجهد المتردد والجهد المستمر مقبولين بنفس الدرجة : مصابيح الإضاءة المتوهجة ، الموقد الكهربائى ، التحليل الكهربى ، جهاز التيلفزيون ، الضوء الفلورى ، الساعة الكهربائية .

٤ – اعقد تشابها بين تذبذب كتلة m على زنبرك وتذبذب دائرة LC . أى كميات النظام الميكانيكى تناظر L ، C فى النظام الكهربائى ؟ اشرح .

٥ – قارن بين معادلة تردد الرنين لكتلة تتذبذب عند طرف زنبرك مع معادلة الرنين لدائرة LC . ماهى أوجه الشبه التى يمكن ملاحظتها بين المعادلتين ؟

٦ – يتصل فولتميتر (dc) عبر طرفى مذبذب متغير التردد . ماهو سلوك الفولتميتر عند تغير تردد الجهد المتذبذب من 0.01 إلى 100cps . اشرح .

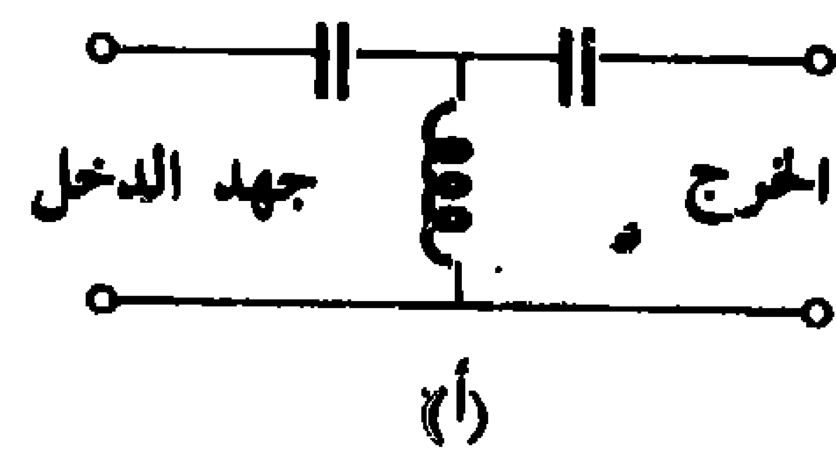
٧ – لماذا لايعتبر من الحكمة استخدام خط 1000 V للتيار المتردد فى المنزل على الرغم من أن هذا أكثر اقتصادية من حيث كمية الأسلاك ؟

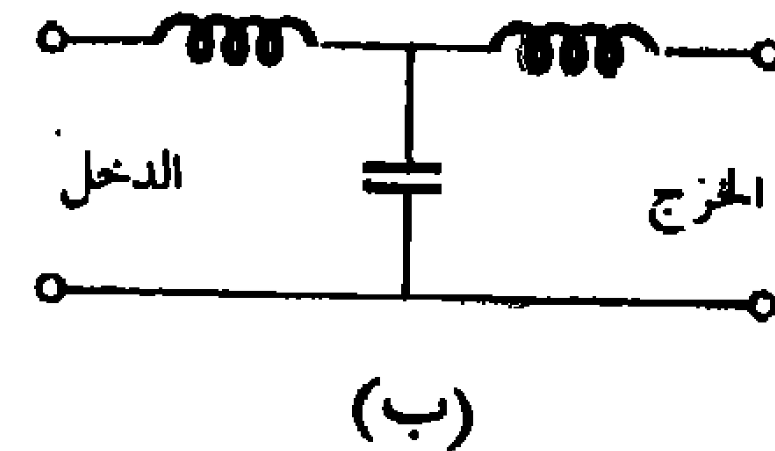
٨ – لو أمكن عن طريق السحر إيجاد وعاءين يمتلىء أحدهما بالشحنات الموجبة والآخر بالسالبة ، وأنه يمكنك أن تغرف كميات صغيرة حسبما تشاء . كيف يمنك استخدام هذه الشحنات لكى تنشىء ذبذبات كبيرة فى دائرة LC ؟ لو أمكنك أن تعرف كمية محدودة فقط دفعة واحدة ، فما هو تأثير الزيادة البطيئة فى مقاومة الدائرة السابقة ؟

٩ – نشر هذا التصريح فى صحيفة يومية : « حذر مدير الصحة بالمدينة ج . ر . سميث من أن الأجهزة الكهربائية المنزلية يمكن أن تسبب إصابات قاتلة . وقد جاء هذا التعليق اثر وفاة صبى يبلغ ١٨ عاما تعرض للصعق حين أدخل عرضا شوكة طعام داخل محمصة الخبز الكهربائية . وصرح د . سميث أنه حتى الأشخاص البالغين قد يقتلون بمثل هذه الصدمات الكهربائية . وأضاف أن التيار العادى فى المنازل يبلغ 110 volts ولكن الجهد يزداد حين يكون التيار « مؤرضا » . كيف كان يجب أن تصاغ الجملة الأخيرة .

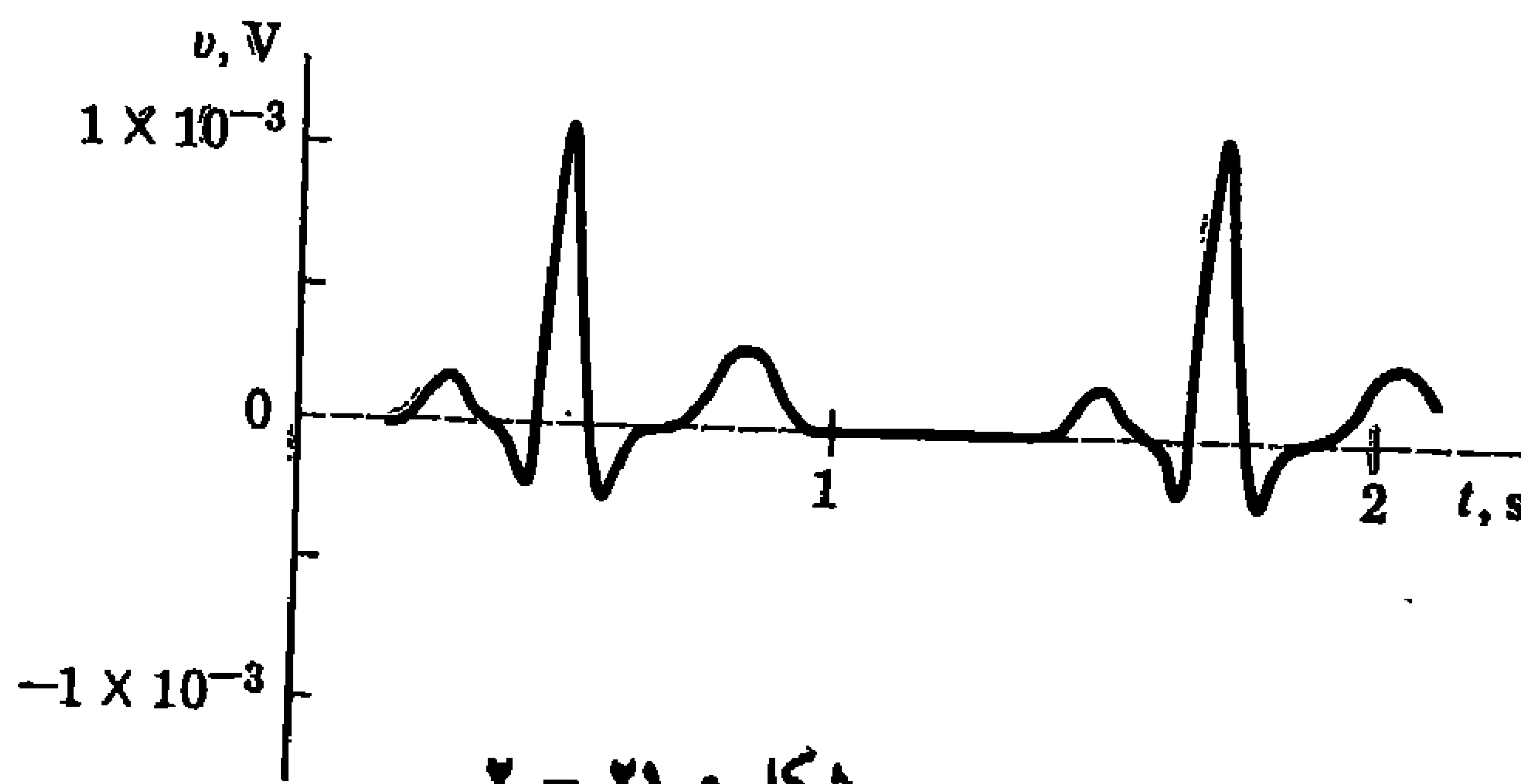
١٠ – تسمى الدوائر المبينة فى الشكل م ٢١ – ١ **مرشحات** . حين يدخل جهد متردد إلى إحدى هذه الدوائر فإن جهد الخرج المتردد يعتمد على تردد الجهد المتذبذب . تقوم إحدى هذه الدوائر بالسماح لجهد الدخل بالمرور دون أية اضطرابات فيه إذا كان تردد الذبذبة عالياً . أما الأخرى فتسمح بمرور الجهود ذات التردد المنخفض فقط . اشرح حقيقة الأمور فى كل حالة .

١١ – يوضح الشكل م٢١ – ٢ نموذجا لمخطط بيانى كهربائى لعمل القلب وهو عبارة عن فرق الجهد بين الرجل اليسرى والذراع اليسرى . اوجد من الرسم قيمة الجهد المتوسط ، جهد (rms) والعلاقة بين الجهد الذروى وجهد (rms) لهذا الشكل الموجى . لم لاينحرف جلفانومتر بسيط حين يتصل بالنقطتين المذكورتين على جسدك ؟ (ق) .





شكل م ٢١ – ١



شكل م ٢١ – ٢

مسائل : .

١ – تتكون دائرة توال من بطارية 60.0V ومقاوم2×10^{6}-Ω ، مكثف 4.0-μF ومفتاح مفتوح وكان المكثف فى البداية غير مشحون ، ثم أغلق المفتاح . (أ) ماهو الثابت الزمنى للدائرة ؟ . (ب) ماهو الزمن اللازم بالتقريب لكى يصبح المكثف مشحونا بمقدار الثلثين ؟ (ح) مامقدار الشحنة التى تسرى إليه خلال الزمن المحسوب فى (ب) ؟ (د) مامقدار التيار المتوسط بالتقريب والذى سرى إلى المكثف خلال تلك الفترة الزمنية ؟

٢ – افترض أنك قمت بقياس مقاومة جسدك فيما بين يديك بواسطة أوميتر ووجدتها تبلغ 62,000 Ω ، ثم شحن مكثف 12.0-μF الى جهد قدره 9V ثم فصل طرفاه . لو أنك قبضت على طرفى المكثف بيديك ، (أ) فما هو الثابت الزمنى للدائرة المحتوية على جسدك والمكثف ؟ (ب) كم يكون فرق الجهد تقريبا بعد $\frac{3}{4}$ s بين طرفى المكثف ؟ . (جـ) كم كانت الشحنة على المكثف حين كان فرق الجهد عبره هو 9V ؟ (د) كم كان بالتقريب التيار الذى سرى خلال جسدك فى هذه الفترة $\frac{3}{4}$s ؟

٣ – يقرأ أميتر عادى 2.0A حين يوصل فى دائرة تيار متردد . ماهو التيار الذى يسرى فعلا فى الدائرة ؟

٤ – يقرأ فولتميتر عادى 120 V حين يكون متصلا عبر خط التيار المتردد بالمنزل . ماهو فرق الجهد الأقصى بين الخطوط ؟

٥ – يمر تيار معطى بالعلاقة $i = 5 \sin 360t$ فى خلال مقاوم 20-Ω. مامقدار القدرة التى تتبدد فى المقاوم ؟

٦ – طبق جهد مقداره $v = 60 \cos 360t$ عبر مقاوم قيمته 20-Ω. مامقدار القدرة التى تتبدد فى المقاوم ؟

٧ – مصدر جهد يعطى (rms) 120V بتردد قدره 60Hz . وصل هذا المصدر مع مكثف قدره 10-μF مباشرة . مامقدار تيار (rms) فى الدائرة ؟

٨ – مامعامل تغير التيار فى دائرة مكثف إذا تغير تردد مصدر الجهد فصار أكبر 10.000 مرة دون أن يتغير الجهد ؟ (لاتحتوى الدائرة إلا على المكثف ومصدر الجهد) .

٩ – يتصل مصدر جهد متردد عبر ملف محاثة 0.5H وعديم المقاومة مباشرة . ماهو مقدار الجهد الذى يؤدى إلى مرور تيار قدره 2A إذا كان التردد (أ) 60 Hz ، (ب) 6×10^{5} Hz ؟

١٠ – يتصل جهد مقداره 100V وتردده $180/\pi$-cps عبر مقاوم 20-Ω . اوجد التيار المسحوب من مصدر الجهد . (ب) أعد (أ) إذا كان التردد $18,000/\pi$ cps (ح) مامقدار القدرة المتبددة فى المقاوم كل مرة ؟

١١ – كرر المسألة رقم (١٠) إذا حل مكثف 1.00-μF محل المقاومة

١٢ – كرر المسألة رقم (١٠) إذا حل ملف محاثة 0.10H محل المقاومة .

١٣ – يتصل ملف محاثه 0.10 H ومقاومته 36 Ω. عبر مصدر يعطى 120 V وتردده $180/\pi$-cps . مامقدار التيار الذى يسحب من المصدر ؟

١٤ – ملف محاثة قيمته 0.10 H يسحب تيارا قدره 2.0A حين يوصل عبر مصدر يعطى جهدا 100V وتردده 60 Hz . ماهى مقاومة الملف ؟

١٥ – (أ) ماهى قيمة المكثف الواجب توصيله مع ملف 0.10 H إذا كان للمجموعة أن ترن عند تردد مقداره 60 Hz ؟ (ب) ماهى قيمة ملف المحاثة الذى يحدث رنينا عند هذا التردد إذا اتصل بمكثف مقداره 1-μF ؟

١٦ – وصل مكثف وملف محاثه على التوالى عبر مصدر 12V ذى تردد 60 Hz . كانت محاثة الملف $\frac{1}{6}$H ومقاومته 20 Ω أما سعة المكثف فكانت 1 μF (أ) اوجد التيار المار فى الدائرة . (ب) كرر لتردد يبلغ 6000 Hz

١٧ –* (أ) ماهى قيمة ملف المحاثة الواجب توصيله على التوالى مع مكثف 10-μF ، مقاوم 20 ومصدر 100-V, 60-Hz إذا كان التيار المار فى الدائرة 4A (ب) كرر لتردد يبلغ 6000 Hz

١٨ – وصلت العناصر التالية على التوالى عبر مصدر للجهد 100 v ‏200/π-cps، $R=10.0\,\Omega$ ، $C=2.50\,\mu F$ ، L=2.5 H
(أ) مامقدار التيار المسحوب من المصدر عندما تكون كل العناصر متصلة على التوالى عبره ، (ب) ماهى القدرة المتبددة فى الدائرة ؟ (ح) مامقدار عامل القدرة ؟

١٩ – كرر المسألة (١٨) إذا تغيرت قيمة L فصارت 5.00H

٢٠ –* تم لف ملف كبير من السلك على قطعة اسطوانية من الخشب . باستخدام أجهزة القياس المناسبة وجد أن مصدر للتيار المستمر 10V ينتج تيارا قدره 0.50A خلال الملف بينما يجعل مصدر آخر للتيار المتردد 70 V ، 60 Hz تياراً يمر فى الملف مقداره 2.00A ماهى محاثة الملف ؟

٢١ –* يسحب ملف محاثة تيارا قدره 0.60A عندما يتصل عبر بطارية 12 V بينما يسحب 3A حين يتصل عبر مصدر 120 V ، 60 Hg اوجد (أ) القدرة المسحوبة من مصدر التيار المتردد و (ب) محاثة الملف .

٢٢ –* يتصل ملف 60 mH عبر مصدر 12o V ، 60 Hg ماهو مقدار الطاقة التى يبددها ؟

٢٣ – يريد أحد أصحاب المصانع أن يقتنى وحدة تسخين كهربائية لموقده 2000 W بالإضافة إلى ثلاث وحدات 1000 W هل من الممكن توصيل هذا الموقد بخط منزلى 120 A ، 30 A أم يجب أن يصمم ليعمل على 240 V ؟

٢٤ – تحتاج سخانات بعض الصمامات المفرغة إلى جهد مقداره 6V كم يجب أن تكون نسبة عدد لفات الابتدائى إلى لفات الثانوى فى محول يستعمل لتشغيل الصمام من خط 120 V ؟ لو أن المحول وصل – بطريقة غير مقصودة – بالعكس فكم سيكون الخرج عند طرفى الملف الثانوى ؟

٢٥ – تحتاج لافتات النيون إلى جهد يبلغ 12, 000 V لتشغيلها . كم يجب أن تكون النسبة N_S/N_P لمحول يسمح لهذه اللافتات بالعمل من خط 120 V ؟

الفصل الثانى والعشرون

الالكترونيات والأمواج الكهرمغناطيسية

رأينا فى الفصل السابق أن تذبذب الشحنات بتردد محدد يمكن أن يحدث فى أنظمة كهربائية رنانة تتكون من سعة ومحاثة . ومثل تلك الدوائر تستخدم على نطاق واسع فى النبيطات الالكترونية اللازمة لتوليد واستقبال الأمواج اللاسلكية .

سنناقش فى هذا الفصل أساسيات بعض من هذه النبيطات وسنبحث علاوة على ذلك كيف تتولد الأمواج اللاسلكية وكيف تستقبل بواسطة هذه النبيطات . وسنجد أن هذه الأمواج ليست الا جزءا صغيرا من تشكيلة ضخمة من الأمواج تسمى الأمواج الكهرمغناطيسية . سنبحث فى طبيعة الاشعاع الكهرمغناطيسى وسنجد أن هذا الاشعاع يتضمن مجموعة متباينة من أنماط الحركة الموجبة مثل موجات : اللاسلكى ، الاشعاع الحرارى ، الضوء وأشعة اكس .

٢٢ - ١ الابتعاث الثرميونى

هناك تصنيفان رئيسيان للنبيطات الالكترونية . يشمل أولهما تلك النبيطات التى تستخدم فيها الصمامات المفرغة بينما يحيط الثانى بتلك الأنظمة الالكترونية التى تستخدم فيها نبيطات الحالة الصلبة مثل الترانزستور . ومن الطبيعى أن يكون هناك العديد من الأجهزة الالكترونية التى تستخدم كلا من الصمامات المفرغة ونبيطات الحالة الصلبة . سنقوم الآن بتعلم شيء عن الابتعاث الثرميونى ، وهو ظاهرة أساسية لجميع الصمامات المفرغة .

يمكننا بالتقريب الأولى اعتبار الكترونات التكافؤ فى معدن ما على أنها حرة الحركة فى أى اتجاه داخل المعدن.ولذا فهى تسلك فى كثير من النواحى سلوك جزيئات غازية داخل وعاء . ففى حالة المعدن يكون سطح المعدن هو الوعاء ومن الممكن تعلم الكثير عن سلوك الكترونات التكافؤ فى معدن ما اذا ما نظرنا اليهم على أنهم غاز الكترونى ، أى غاز مكون من الكترونات بدلا من جزيئات . سنستخدم مفهوم الغاز الالكترونى لنناقش ظاهرة الابتعاث الثرميونى وتحرر الالكترونات من معدن محمى لدرجة الابيضاض .

يمكننا حساب طاقة الحركة لالكترونات التكافؤ داخل معدن ما بسهولة ، فمن الفصل العاشر نذكر أن قانون الغازات يمكن أن يكتب على صورتين مختلفتين ،

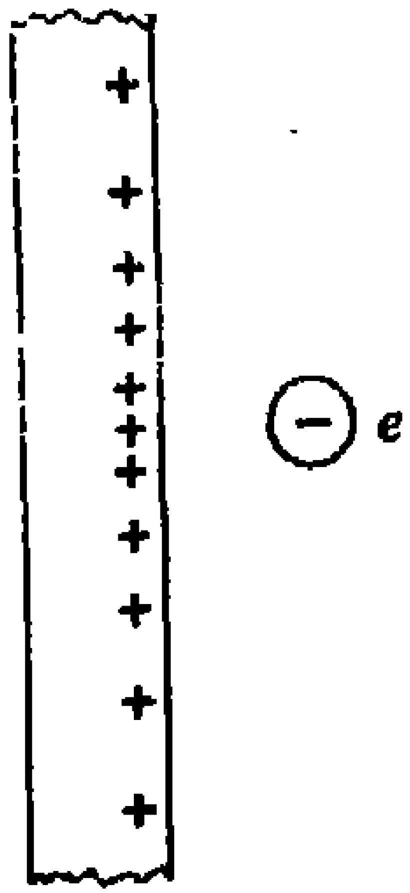
$$PV = \nu_0 kT \quad \text{و} \quad PV = \tfrac{2}{3}\nu_0(\tfrac{1}{2}m_0 v^2)$$

حيث P هى ضغط ν_0 من جزيئات الغاز التى تبلغ كتلة كل منها m_0 محصورة فى حجم قدره V عند درجة حرارة مطلقة T الكمية $\frac{1}{2}m_0v^2$ هى طاقة حركة جزىء غازى ، k ثابت بولتزمان وهو يساوى 1.38×10^{-23} j/k .بمساواة هاتين المعادلتين ينتج أن :

$$\tfrac{1}{2}m_0 v^2 = \tfrac{3}{2}kT$$

تدل هذه المعادلة على أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزىء أى غاز مثالى موجود داخل أى صندوق هو $\frac{3}{2}kT$ تماما.وهذا الأمر يجب أن يكون صحيحا أيضا بالنسبة لغاز الكترونات التكافؤ داخل كتلة من المعدن بشرط أن تكون هذه الالكترونات قادرة على أن تطفو بحرية داخل المعدن . اذا ما وصلنا الى هذا الحد من التقريب فان لدينا تلك النتيجة الهامة وهى أن كل الكترون تكافؤ فى معدن ماله متوسط طاقة حركة يساوى $\frac{3}{2}kT$ وبالطبع سيكون لدى بعض هذه الالكترونات

طاقة أكبر من هذه والبعض الآخر أقل ولكننا سنستعمل هذا المقدار كأساس للمناقشة* .



شكل ٢٢ – ١
على الالكترون التغلب على جذب الشحنات المستحثة على سطح المعدن اذا رغب فى الهرب من المعدن

هل هناك أية امكانية لهروب الالكترون من المعدن ؟ للاجابة على هذا السؤال يجب أن نعرف ما الذى يمسك بالالكترونات داخل المعدن . الجانب الأكبر من القوة التى تمسك بالالكترونات فى المعدن ذات أصل الكتروستاتى صرف . لنعتبر ما الذى يمكن أن يحدث اذا حاول الكترون أن يغادر كتلة الى خارجها . يقوم الالكترون السالب بحث شحنة موجبة على سطح المعدن بمجرد وجوده خارج السطح المعدنى كما هو مبين فى الشكل ٢٢ – ١ . تقوم الشحنة الموجبة بدورها بالتأثير بقوة جذب على الالكترون محاولة اعادته مرة أخرى الى المعدن .

ولن يكون الالكترون قادرا على الهرب مالم يكن لدية من طاقة الحركة ما يكفى ليتغلب على هذا الجذب .

يتضح لنا من هذه الاعتبارات أن قدرا معينا من الشغل ضرورى لانتزاع الالكترون من المعدن ، ومالم يكن لدى الالكترون ما يكفى من طاقة الحركة لبذل هذا الشغل ، فلن يهرب . تسمى كمية الطاقة اللازمة للتغلب على القوى الممسكة للالكترون داخل المعدن وانتزاع الالكترون ليصبح طليقا دالة الشغل للمعدن . يجب الاشارة هنا الى أن الطاقة التى تحدثنا عنها هى جزء فقط من طاقة دالة الشغل أما الطاقات الاخرى المتضمنة فمن الصعب جدا حسابها ولن نتمكن من مناقشتها هنا .

دالة الشغل

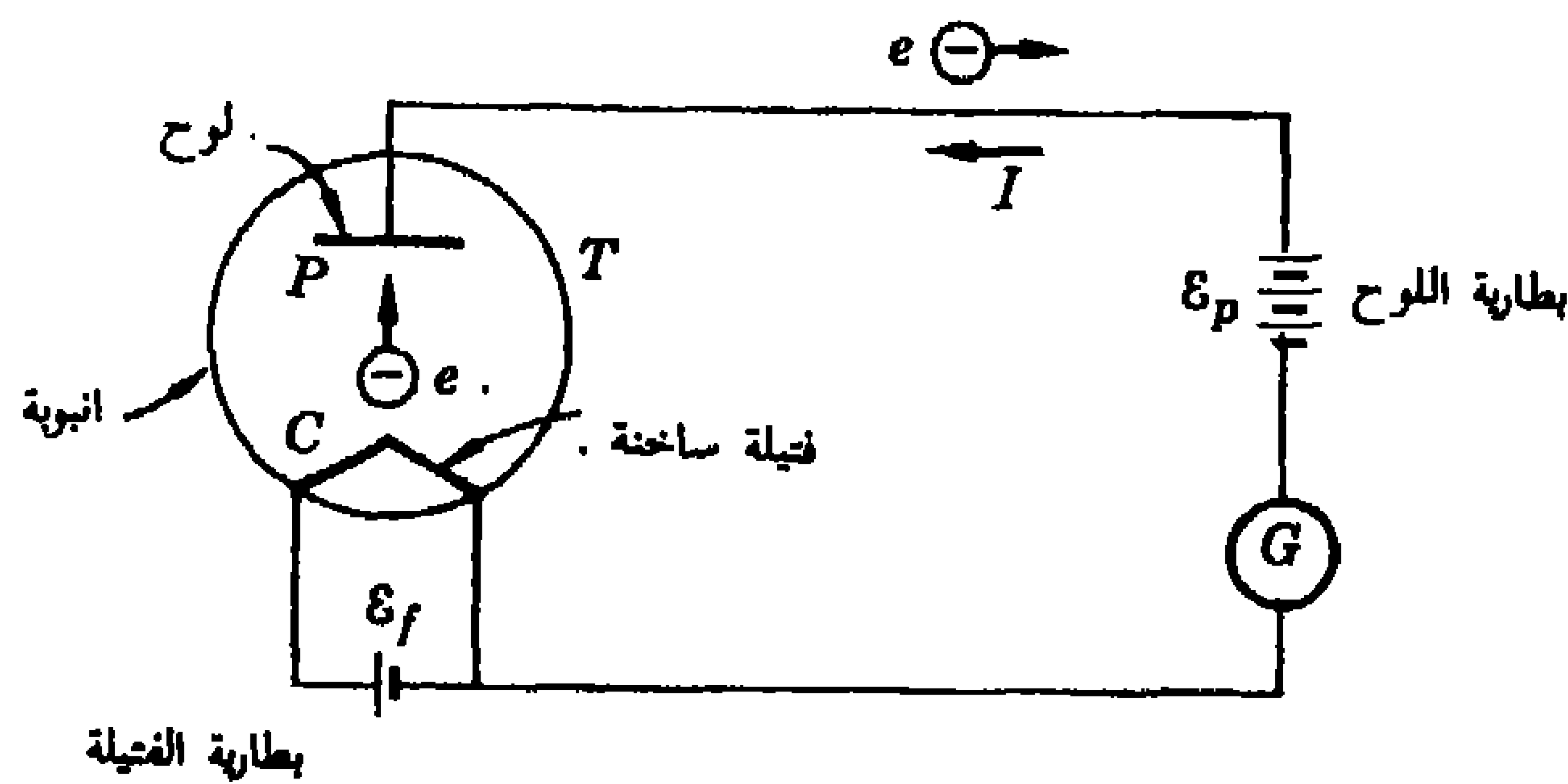
فى ضوء ما سبقت مناقشة نرى أن الالكترون يستطيع الهرب من معدن ما بشرط أن تكون لدية طاقة حركة كافية . وبما أن متوسط طاقة حركة الالكترون يتناسب مع درجة حرارة المعدن تناسبا طرديا ، فان من الواضح أنه يجب تسخين المعدن قبل أن يتمكن الالكترون من الهرب . ولمعظم المعادن ، لا يتمكن عدد محسوس من الالكترونات من الهرب من سطح المعدن مالم يسخن الأخير لدرجة الاحمرار .

٢٢ – ٢ الصمام الثنائى والتقويم

يعتبر مبدأ الابتعاث الثرميونى أساسيا لعمل الصمام الثنائى ، وهو أبسط طراز للصمامات المفرغة . يتكون هذا الصمام من عنصرين أساسيين موجودين داخل

* عند درجات الحرارة المنخفضة والطاقات المنخفضة للالكترون تصبح تأثيرات نظرية الكم هامة ويصبح تقريب الغاز الالكترونى خاطئا . على أنه عند درجات الحرارة المرتفعة وطاقات الالكترونات المرتفعة فان هذا التقريب يكون صالحا للاستعمال. سنعنى هنا بالالكترونات ذات الطاقة العالية ولذا يكون تقريب الغاز الالكترونى صالحا .

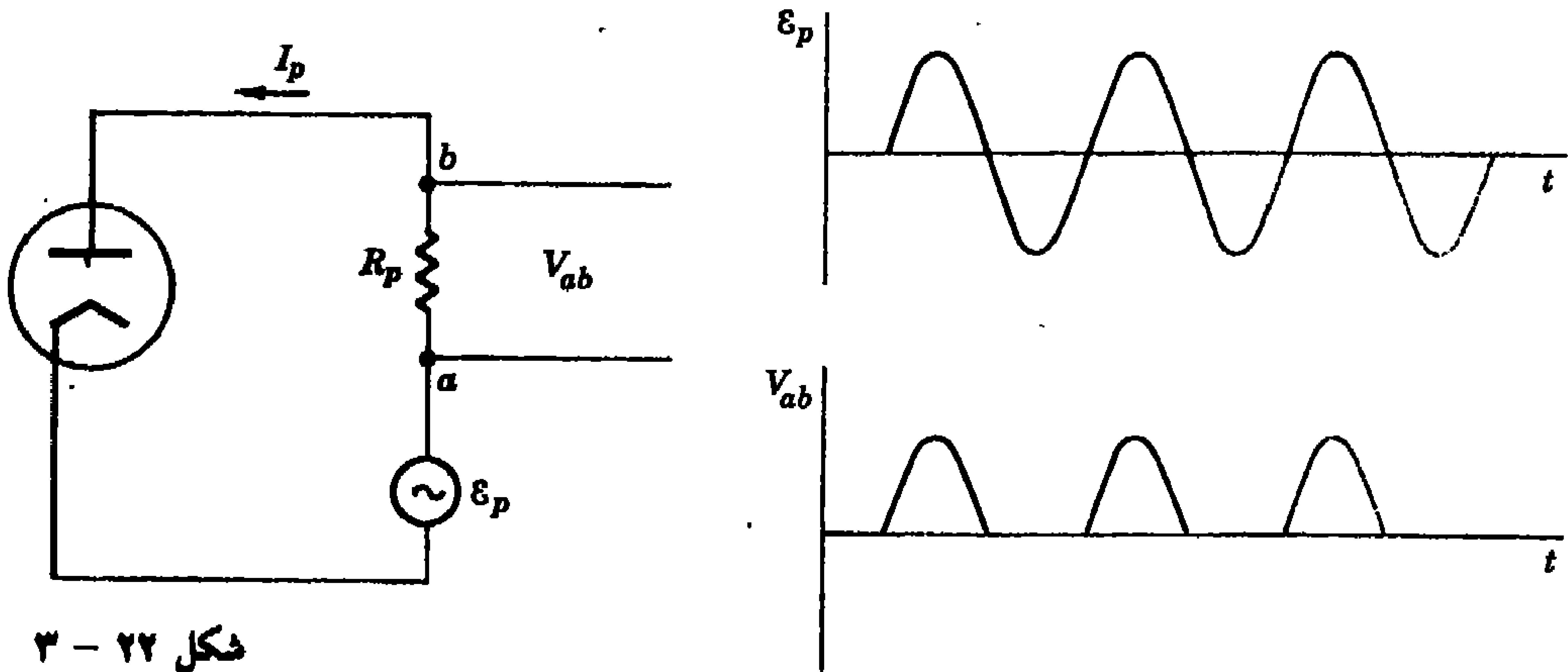
انبوبة زجاجية مفرغة T كما هو مرسوم فى الشكل ٢٢ — ٢ . تستخدم قطعة من المعدن الساخن ، المهبط ، أو الفتيلة ، كمصدر للالكترونات . وأحيانا يكون المهبط مجرد سلك دقيق يسرى خلاله تيار فيسخنة لدرجة الاحمرار وهذا ما يصوره الشكل . يكون جهد المهبط أو الفتيلة $\mathcal{E}_f$ فى حدود 5v فى التطبيقات العملية . وتستخدم بعض الصمامات الثنائية مهبطا ذا تسخين غير مباشر وفى هذه الحالة لن يكون هناك $\mathcal{E}_f$ المذكورة فى الشكل ٢٢ — ٢ وبدلا منها يكون هناك عنصر تسخين منفصل ، وغير متصل كهربيا مع C ، يقوم بتسخين المهبط .



شكل ٢٢ — ٢
تبعث الالكترونات من المهبط الساخن C وتنتقل خلال الصمام المفرغ T لتصل الى اللوح الموجب P

فى كلتا الحالتين يتم تسخين المهبط بدرجة كافية تسمح بحدوث ابتعاث ثرميونى محسوس . أما العنصر الآخر داخل الصمام وهو لوح معدنى غير مسخن فالغرض منه جمع الالكترونات المبتعثة من المهبط الساخن ، وحيث أن الصمام مفرغ فان الالكترونات الخارجة من الفتيلة ستتحرك بحرية الى أن تصطدم مع جدران الصمام أو مع اللوح . ولكن نظرا لوجود فرق للجهد بين الفتيلة واللوح والذى توفره بطارية اللوح $\mathcal{E}_p$ فان الالكترونات المبتعثة من المهبط تنجذب بواسطة اللوح . تكون قيمة $\mathcal{E}_p$ فى معظم الصمامات حوالى 200V أو أكثر وتجمع كل الالكترونات التى يبعثها المهبط تقريبا بواسطة اللوح .

يستخدم الصمام الثنائى على نطاق واسع نظرا لأثره التقويمى ، فكما أشرنا فى الفصل السابق فانه من الأكثر ملائمة — من الناحية العملية — انتاج ونقل التيار المتردد بدلا من التيار المستمر . على أننا نحتاج التيار المستمر فى عديد من الأغراض مثل شحن البطاريات ، الطلاء الكهربائى وخاصة للنبيطات الإلكترونية . يمكن الحصول على التيار المستمر من التيار المتردد باستعمال صمام ثنائى كما هو مبين فى الشكل ٢٢ — ٣ ، حيث استبدل ببطارية اللوح الجهد المتردد المراد تقويمة .



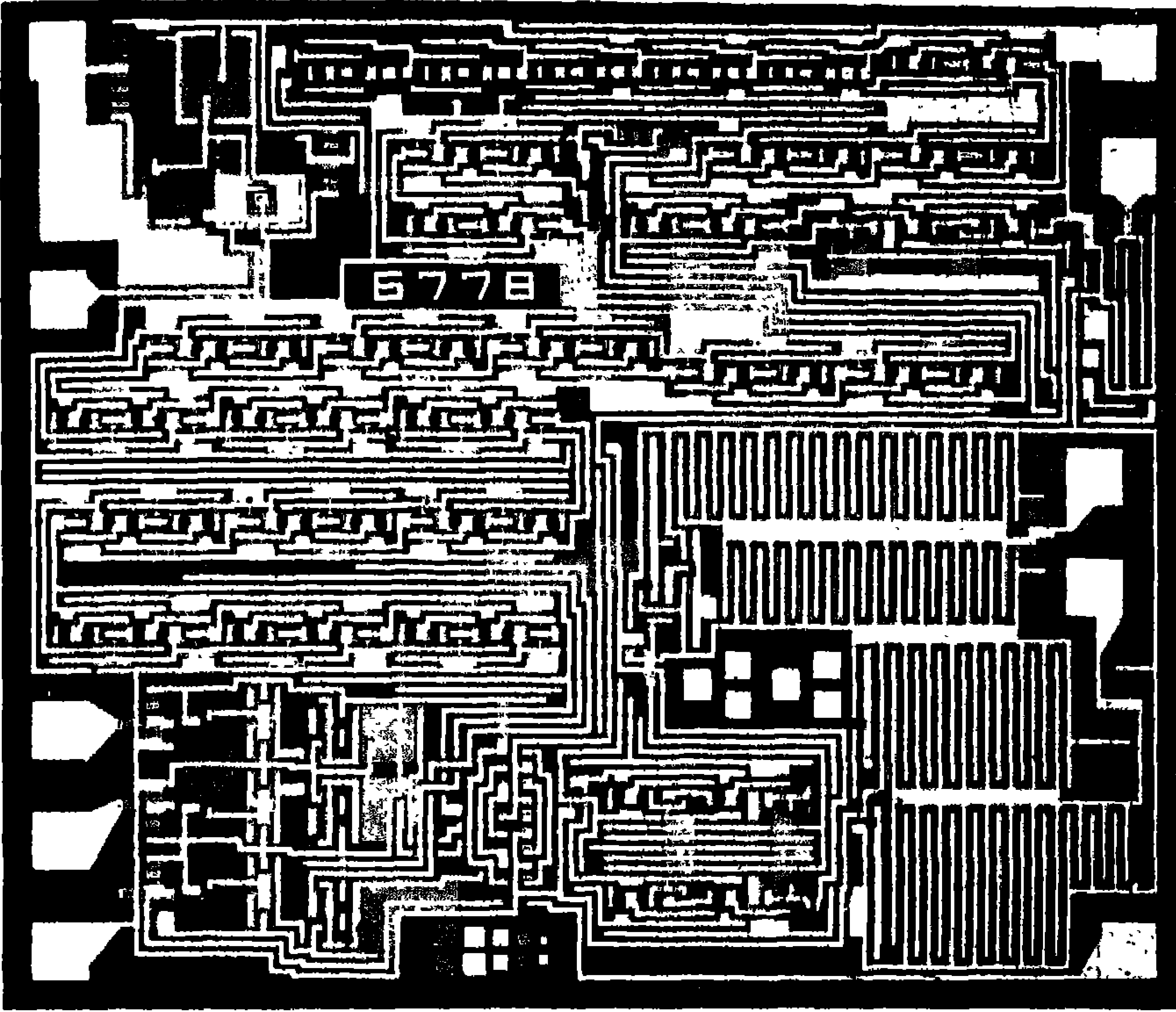
شكل ٢٢ – ٣
على الرغم من أن الجهد $\mathcal{E}_p$ متردد كما هو موضح الا أن دائرة الصمام الثنائى تنتج جهدا مقوما V_{ab} عبر مقاوم الحمل

يتناوب الجهد $\mathcal{E}_p$ كما هو واضح فى الشكل ٢٢ – ٣ ، فحين يكون $\mathcal{E}_p$ موجبا يكون اللوح موجبا والفتيلة سالبة ، وتمر الالكترونات التى تبعثها الفتيلة الساخنة الى اللوح بما ينشىء تيار اللوح I_p . ولما كان هذا التيار يمر خلال R_p أو مقاوم الحمل ، أو مقاوم اللوح فان فرقا للجهد ينشأ بين النقطتين a و b وهو V_{ab} على أنه حين تنعكس $\mathcal{E}_p$ ويصير اللوح سالبا بالنسبة للفتيلة فان الالكترونات القادمة من الفتيلة ستتنافر مع اللوح وتنخفض I_p الى الصفر ، أى أن V_{ab} سيكون صفرا حين تكون $\mathcal{E}_p$ سالبة . يوضح الشكل ٢٢ – ٣ أيضا تغير V_{ab} ومن الواضح أن V_{ab} لا يصير سالبا أبدا وبهذا نكون قد نجحنا فى تحويل جهد متردد $\mathcal{E}_p$ الى جهد مستمر .

٢٢ – ٣ الصمام الثنائى شبه الموصل

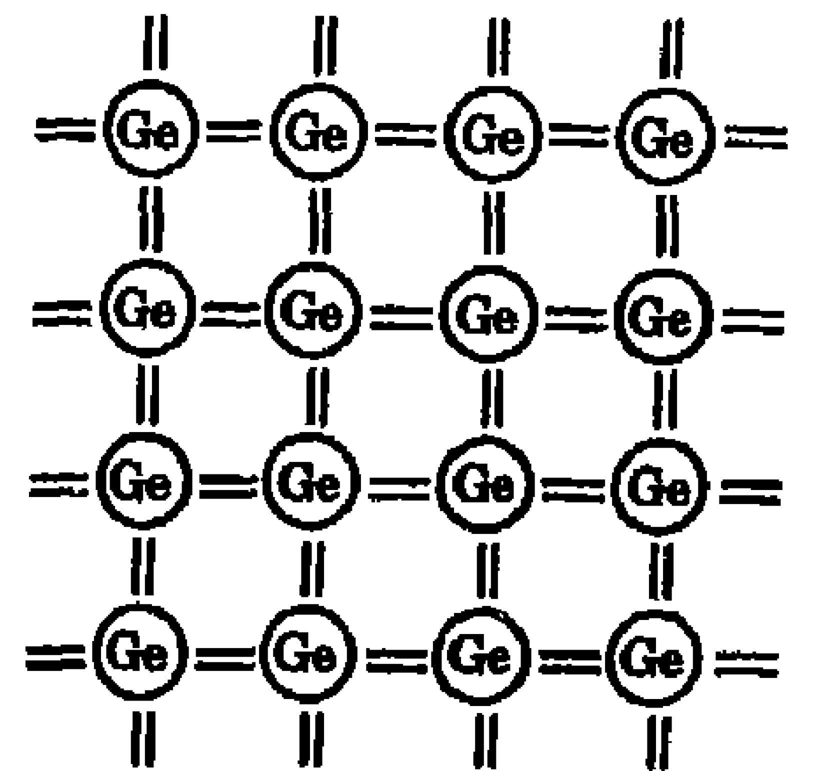
من المحتمل أن تكون على علم بأن المزيد من الأجهزة الالكترونية قد صارت تستخدم نبيطات شبة موصلة مثل الترانزستورات والصمامات الثنائية بدلاً من الصمامات المفرغة . فهذه النبيطات عبارة عن قطع صغيرة من مواد صلبة متبلرة لا تحتاج الى أية حرارة لتشغيلها . وحيث أن الفتيلة كما هى لا لزوم لها فان مقتضيات الدوائر والقدرة أقل من حالة نبيطات الصمامات المفرغة العادية . علاوة على ذلك ، يمكن جعل هذه النبيطات صغيرة جدا وبذ يتوفر حيز كبير باستخدامها ويمكنك رؤية الدائرة المصغرة المبينة فى الشكل ٢٢ – ٤ على سبيل المثال .

تشكل ذرات السيليكون والجرمانيوم أساسا لكثير من نبيطات أشباه الموصلات . والسيليكون والجرمانيوم النقيين يعتبران غير موصلين وكلتا الذرتين لها أربعة الكترونات تكافؤ او خارجية وعلى كل منهما أن تفقد هذه الالكترونات الأربعة أو تكتسب أربعة



شكل ٢٢ – ٤
تحتوى دائرة التوقيت المصغرة هذه على الالكترونيات الاساسية لساعة كهربائية وعلى الرغم من أنها تحتوى على عدة مئات من الاجزاء الالكترونية الا أن أبعادها التحزيمية تبلغ حوالى 4 x 5 x 2 mm (مجاملة من RCA)

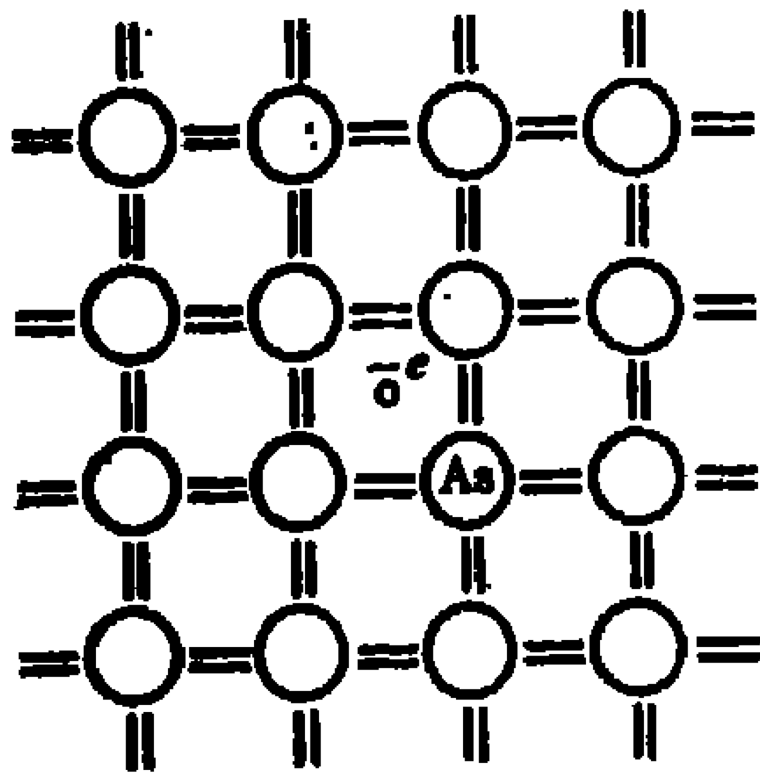
الكترونات أخرى حتى يكون بها قشرات الكترونية مكتملة ، ومن ثم تتحد هذه الذرات مع الذرات الاخرى بحيث تفقد أو تكسب أربعة الكترونات بشكل فعال . وهى تقوم بهذا فى حالة الجرمانيوم والسيليكون البللوريين عن طريق انشاء ترابطات اسهامية مع جيرانها . ومعنى هذا أن كل ذرة تتشارك فى الكتروناتها الاربعة الخارجية مع أربعة ذرات أخرى وبذا يكتفى الجميع . يصور الشكل ٢٢ – ٥ هذا الموقف تخطيطيا حيث تمثل الخطوط التى بين الذرات الكترونا مشتركا . لاحظ أن كل ذرة جرمانيوم حولها ثمانية الكترونات وبذا تكتمل قشرتها الخارجية ، ومثل هذا الموقف موجود بالنسبة للسيليكون .



شكل ٢٢ – ٥
يسمح الترابط الاسهامى لكل ذرة فى الشبيكة أن تملا قشرتها ولا يوجد الكترون واحد حر كى يتحرك فى الشبيكة

افترض الآن اننا أضفنا – عن عمد . كمية متناهية فى الضآلة من ذرات الزرنيخ كشوائب للجرمانيوم الذى تصنع منه بللورة . وقد استخدم الزرنيخ لانه العنصر الذى يلى الجرمانيوم فى الجدول الدورى وله نفس الحجم الذى لذرة الجرمانيوم وعلى هذا فذرات الزرنيخ الشائبة تتلائم جيدا فى الشبيكة البللورية وتحل محل ذرة الجرمانيوم كما يوضح الشكل ٢٢ – ٦

ولأن الزرنيخ خماسي التكافؤ وليس رباعيا ، لذا فله الكترون فائض لا يجد مكانا فى الشبيكة ولذا يكون ضعيف الارتباط بذرة الزرنيخ وسهل عليه الهرب ، فاذا ماصار طليقا أمكنه أن ينتقل خلال البللورة بحرية تامة مثلما يفعل الكترون حر داخل معدن وعلى هذا فالجرمانيوم الذى هو أصلا غير موصل (غير موصل لأن الالكتروناتة مقيدة باحكام داخل تركيب الشبيكة قد اكتسب عدد قليلا من الالكترونات الطليقة) واحدا من كل ذرة زرنيخ شائبة .



شكل ٢٢ — ٦
عندما تحل ذرة الزرنيخ خماسية التكافؤ محل ذرة جرمانيوم فى بللورة من الجرمانيوم فان الكترون التكافؤ الخامس لن يكون مطلوبا لتكملة الترابط الاسهامى وهو لهذا حر نسبياً فى أن يتحرك داخل البللورة

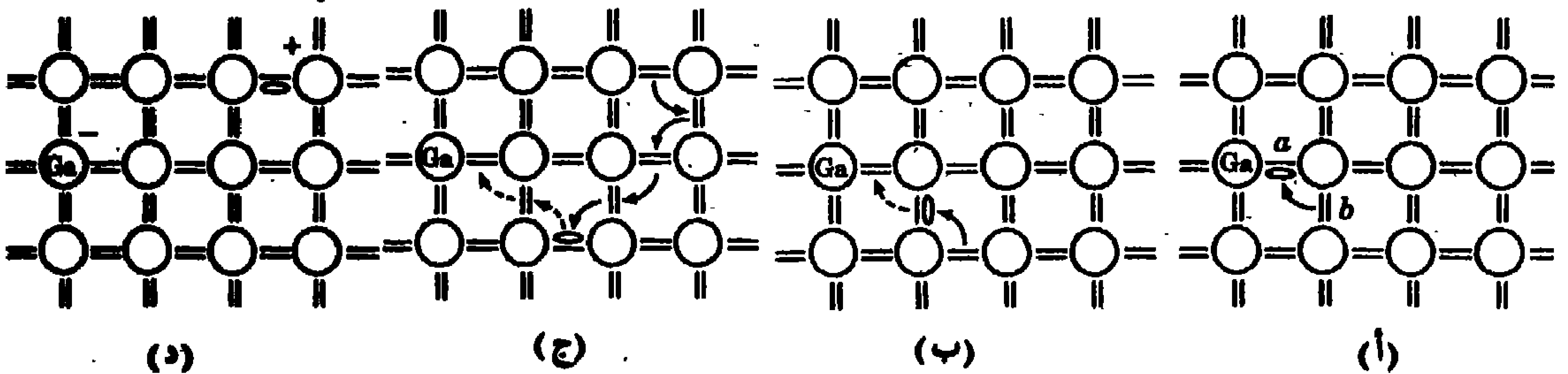
وتصير الآن البللورة المشوبة موصلا وحيث أن عدد الالكترونات الطليقة ضئيل لذا فهى موصل ردىء أو شبة موصل .

وهذا النوع من الأنظمة يمكن الحصول عليه أيضا باضافة قليل من الذرات الشائبة خماسية التكافؤ الى السيليكون (أى الذرات تتوقع أن تكون الأفضل ؟) ويحتوى هذا النوع من البللورات المشوبة مزيدا من الالكترونات التى تعمل كناقلات للشحنة فتحمل التيار خلال البللورة ويسمى هذا النوع من البللورات **شبة موصل سالب النوع ، وذلك لأن ناقلات الشحنة سالبة .**

شكل ٢٢ — ٧
تترك ذرة الجاليوم الشائبة ثلاثية التكافؤ ثغرة فى موقع الترابط (a) داخل شبيكة الجرمانيوم كما فى (أ) . وموقع الثغرة يتحرك هنا وهناك لان الالكترونات تقوم بازاحته . لقد تحركت فى (د) بحرية بعيدا عن ذرة الجاليوم وأصبح تقريبا فجوه حرة الحركة . لاحظ ان ذرة الجاليوم الشائبة قد اصبحت سالبة الشحنة بينما تحمل الفجوة شحنة موجبة معها .

وهناك نوع آخر من أشباه الموصلات يصنع باضافة ذرة ثلاثية التكافؤ مثل الجاليوم الى الجرمانيوم.وفى هذه الحالة تفتقر الذرة الشائبة الى الكترون واحد يلزم لكى تصبح الشبيكة مكتملة . وهذا الثغرة الالكترونية التى يمثلها الشكل البيضاوى فى شكل ٢٢ — ٧ أ تسمى فجوة . ولكن الالكترون الموجود عند b فى شكل ٢٢ — ٧أ سيقوم الآن بالانزلاق بسهولة ليملأ هذه الفجوة مخلفا بهذا فجوة وراءه فى b فينزلق اليها الكترون آخر وهكذا . أى أن الفجوة تصبح طليقة بعيدا عن ذرة الشوائب الاصلية وتتجول داخل البللورة الى حد ما بحرية . وبعد فترة قصيرة يكون الموقف كما هو موضح فى الشكل ٢٢ — ٧ب ،جـ ، د .

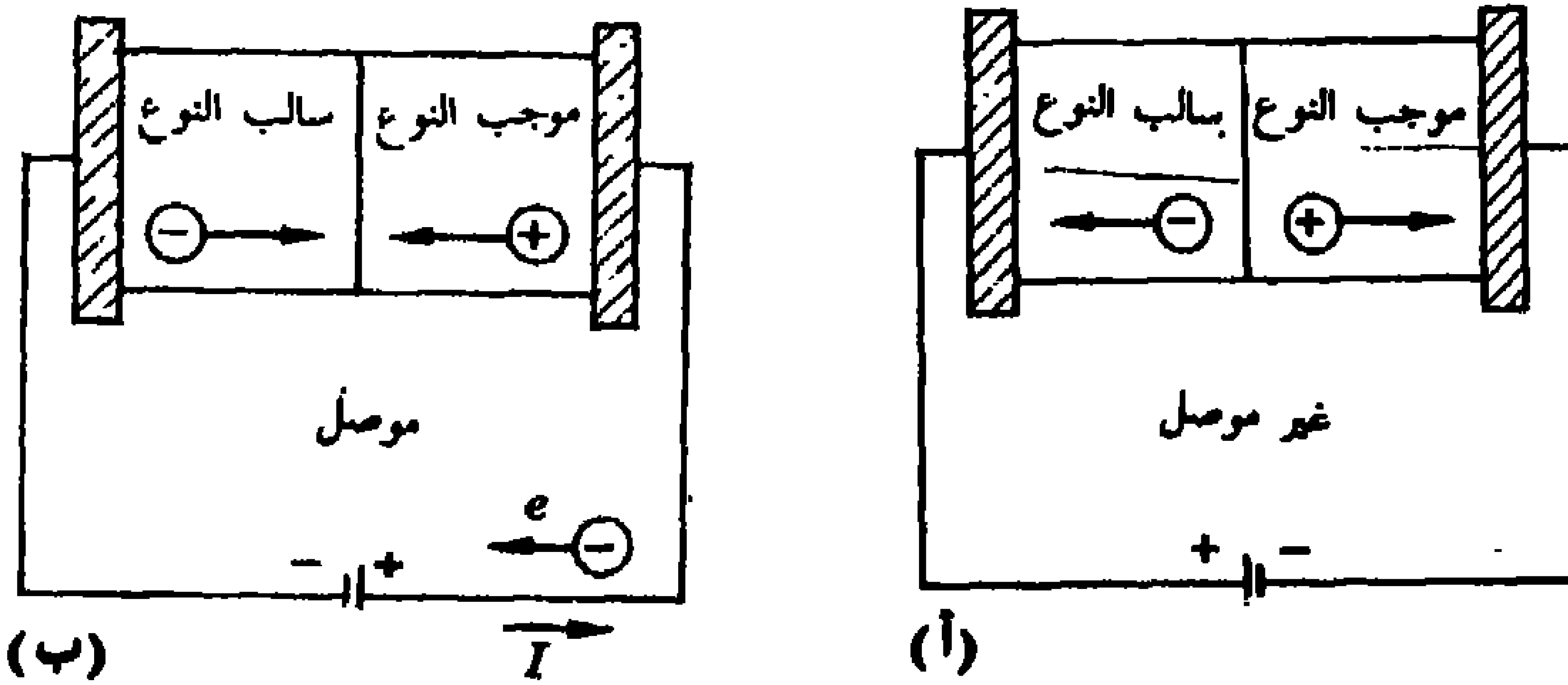
لاحظ ان المنطقة القريبة من الفجوة فى الشكل ٢٢ — ٧ د قد أصبح بها مزيد من الشحنة الموجبة ولم تعد متعادلة (هى فى الواقع تشكو من نقص الكترون



واحد). من ناحية اخرى فان ذرة الجاليوم الشائبة قد أصبح لديها الآن أكثر مما ينبغى وبهذا لم تعد هى الأخرى متعادلة . على أن الالكترون الزائد قرب ذرة الجاليوم مرتبط باحكام تام الى الشبيكة ولذا فهو غير حر فى الحركة فى الوقت الذى لازالت فيه الفجوة حرة فى الحركة . وكلما تحركت الفجوة انتقلت معها الشحنة الموجبة الزائدة . ومن ثم فان الحركة الحرة – الى حد ما – للفجوة خلال البللورة تكافئ شحنة موجبة تتحرك بحرية خلال البللورة . يسمى هذا النوع من البللورات شبة الموصلة **شبة موصل موجب النوع وذلك لأن التيار تحملة فجوات موجبة الشحنة .**

شبة موصل موجب النوع

لصنع مقوم من صمام ثنائى شبة موصل فاننا نجمع شبه موصل سالب النوع مع آخر موجب النوع كما فى الشكل ٢٢ – ٨ (أ) ، (ب) . (من الناحية العملية توضع قطع صغيرة جدا من بللورة شبة موصلة بين اقطاب معدنية . وتوضع المجموعة كلها داخل غلاف معزول مع اطراف تصل الى اللوحين المعدنيين . تكون كل قطعة من شبة الموصل متعادلة كهربيا فى الاصل بطبيعة الحال . علاوة على ذلك ، حيث أن الألواح المعدنية يمكنها استقبال أو اعطاء الكترونات عند الحاجة لذا فالفجوات والالكترونات الزائدة يمكنها الانتقال بحرية نسبيا خلال الوصلة مع المعدن وليس هذا سهلا عند وصلة شبه الموصل كما سنرى .



شكل ٢٢ – ٨
يقوم الصمام الثنائى بتوصيل التيار فى (ب) ولكنه لا يوصله حين ينعكس الجهد كما فى (أ)

افترض ان جهدا طبق على الصمام الثنائى كما هو مبين فى الشكل ٢٢ – ٨أ. ستتحرك الالكترونات والفجوات فى الاتجاهات المبينة . وبما أننا نحاول جاهدين أن نفصل الشحنات السالبة عن الموجبة فان هذا يتطلب قدرا كبيرا من الشغل . لن يمر تيار مطرد فى هذا الموقف لأنه يمكن نزح عدد قليل فقط من الالكترونات والفجوات من شبه الموصل ونتيجة لهذا لن يقوم الصمام الثنائى بتوصيل التيار فى الاتجاه الذى تفرضه البطارية فى الجزء (أ) . أما فى الجزء (ب) فان البطارية المكونة ستجمع الالكترونات والفجوات معا وبذا يقوم الصمام الثنائى بالتوصيل .

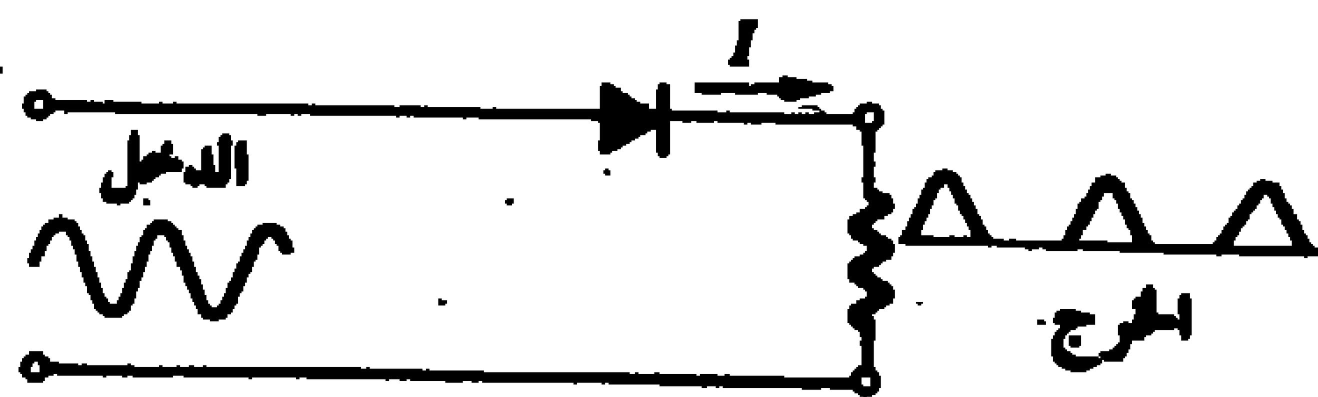
٢٢ - ٤ تطبيقات النبيطات الالكترونية

سنقدم فى هذا القسم قليلا من التطبيقات الهامة للصمامات وبعض النبيطات الالكترونية البسيطة الاخرى.وقد اصبحت تقنية الالكترونيات من التعقيد بحيث أن معظم من يستخدمون نبيطات ألكترونية لا يتوقع منهم أن يكونوا على دراية بالتركيب المفصل لها.وبدلا من هذا فاننا عادة ما نعتبر أن مجموعة الصمامات المفرغة ، الصمامات الثنائية ، الترانزستور ونبيطات الحالة الصلبة الأخرى كوحدات مصممة لأغراض محددة . فعلى سبيل المثال يعتبر التركيب الداخلى لمضخم الكترونى معقدا بدرجة كبيرة ولكن المضخم كوحدة متكاملة يقوم ببساطة بتحويل دخل معين الى جهد خرج اكبر بكثير واذا كان المضخم جيدا فان أمواج جهد الدخل والخرج تكون بنفس الشكل تماما . وكما نرى فان وظيفة ونتائج تشغيل وحدة المضخم يمكن فهمها بسهولة على الرغم من أن التركيب الداخلى معقد جدا .

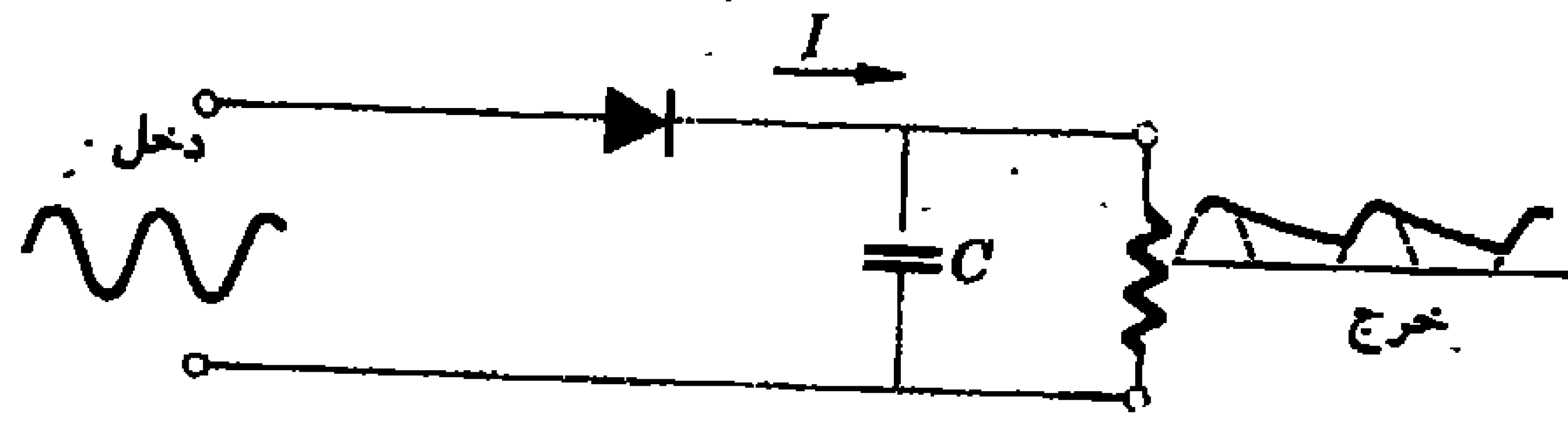
لكى نكتسب خبرة فى مجال استعمال النبيطات الالكترونية كوحدات دوائر سنقوم بفحص قليل من تطبيقاتها وكما سترى لابد أن نعرف أثر النبيطة على اشارة الدخل ولكن التشغيل الداخلى للنبيطة لن يكون ذا أهمية رئيسية فى المناقشة .

١ - مقوم نصف - موجى لقد رأينا فيما سبق كيف تعمل هذه النبيطة وهى مبينة مرة ثانية فى الشكل ٢٢ - ٩ . رمز الصمام الثنائى هو ⊣▷⊢ وهو يوصل فى اتجاه السهم .

٢ - مقوم نصف موجى ، مرشح . هناك مكثف C قد وضع عبر الخرج كما يوضح الشكل ٢٢ - ١٠ . لو أن تيارا يسحب من الخرج ، فإن المكثف سيصبح مشحونا تماما ويحتفظ بجهد مستمر (dc) عند الخرج . يعمل الخرج من الناحية العملية - كمقاومة قيمتها R . فلو أن R كانت كبيرة بما يكفى فان الثابت الزمنى RC سيكون أكبر من فترة الذبذبة لموجة الجهد ، ثم يقوم المكثف بتصريف كمية ضئيلة خلال كل نبضة للجهد ويكون الخرج منتظما تقريبا (ويحدد مفهوم « الانتظام » بكمية « التموج » ، وهى النسبة بين تغيرات الجهد والقيمة العظمى للجهد خلال الدورة)



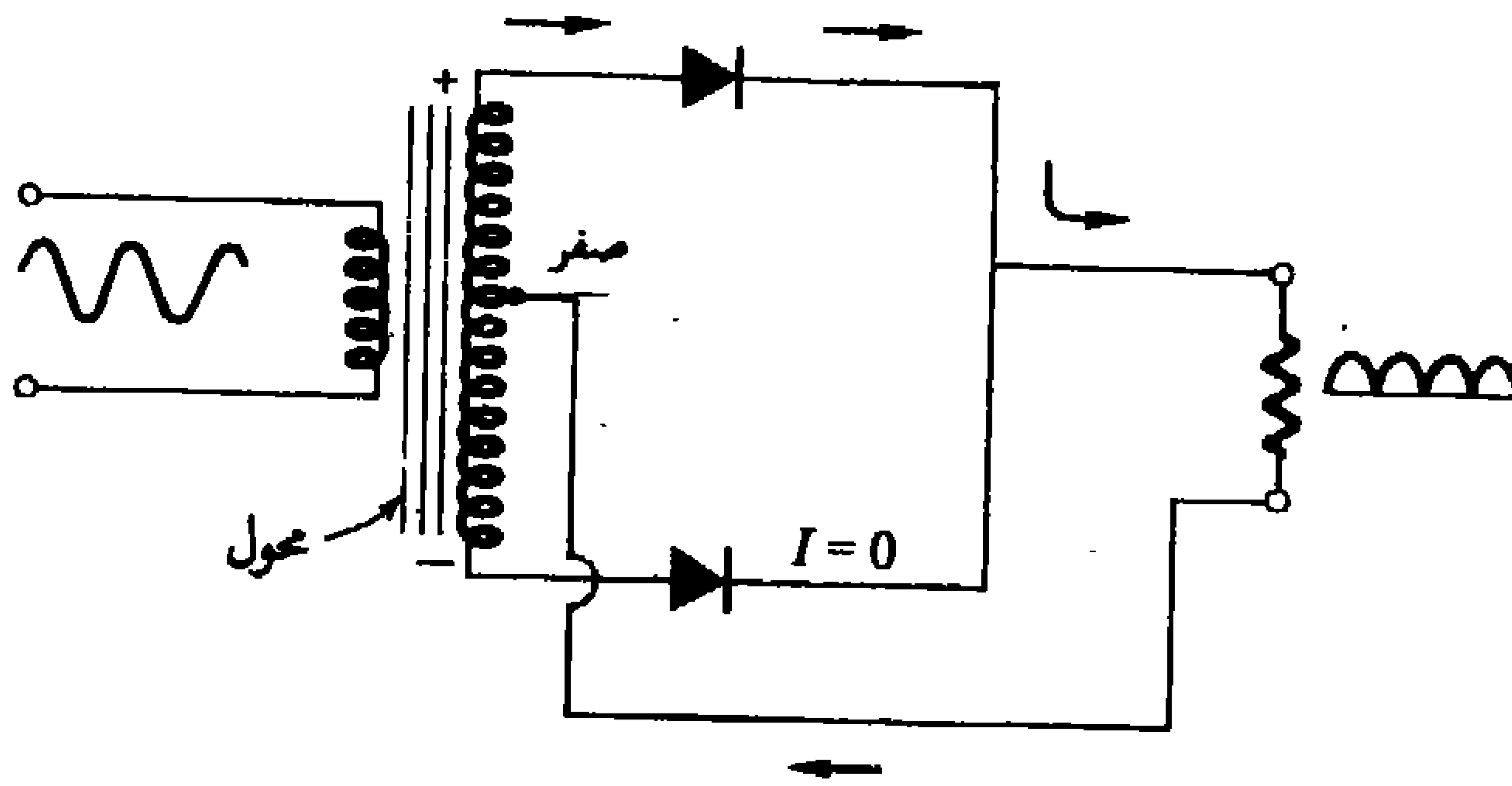
شكل ٢٢ - ٩
مقوم نصف موجى



شكل ٢٢ - ١٠
مقوم نصف - موجى مرشح

٣ - مقوم الموجة الكاملة

بالنسبة للموقف المبين فى الشكل ٢٢ - ١١ يكون الطرف الأعلى للثانوى موجبا والأسفل سالبا وبعد نصف دورة تالى ينعكس الجهد ولكن الصمام الثانى الاسفل سيقوم بتوصيل التيار نحو اليمين نتيجة لهذا يتوفر للخرج تيار خلال نصفى الدورة .



شكل ٢٢ - ١١
مقوم الموجة الكاملة . يقوم المحلول ذو المحبس المركزى بتوفير مصدرى جهد بينهما تفاوت فى الطور مقداره نصف دورة

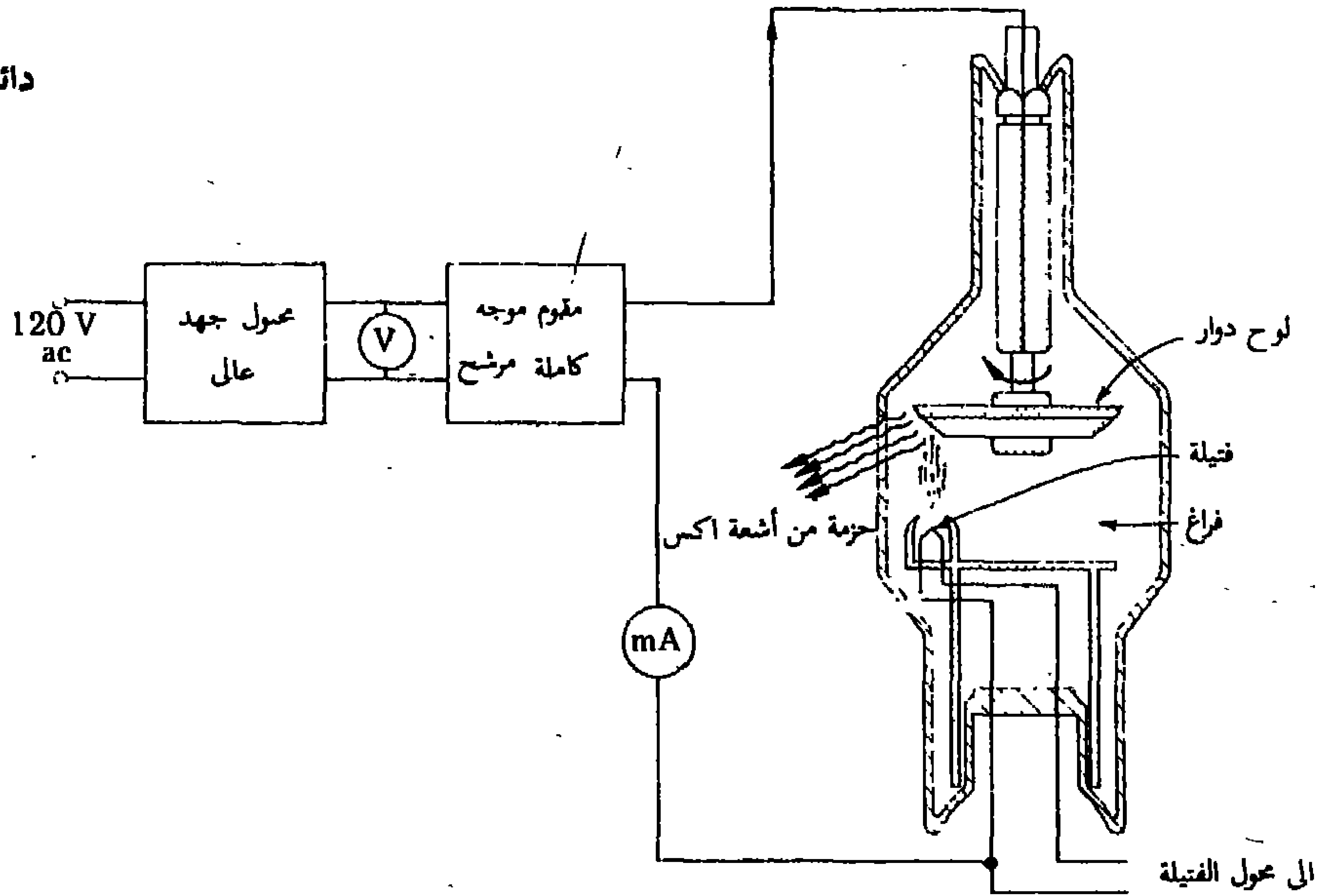
٤ - دائرة انبوبة أشعة - اكس

بالرجوع الى الشكل ٢٢ - ١٢ نجد أن الالكترونات تعجل داخل الانبوبة خلال فرق جهد عال بين الفتيلة واللوح ، ويتسبب اصطدام الالكترونات باللوح فى توليد أشعة اكس عن طريق عمليات سنناقشها فى الفصل السابع والعشرين . يقوم الشعاع الالكترونى بتسخين اللوح فى حالة الأنابيب ذات الخرج العالى ولتقليل هذا التأثير يدار اللوح بسرعة أمام الشعاع .

كما ترى يمكننا توصيل المعلومات الخاصة بدائرة الكترونية بدون عرض تفاصيل كل نبيطه . ونطلق على رسم كالذى فى الجزء الايسر من شكل ٢٢ - ١٢ رسم تخطيطى للمراحل ، ودائما ما يبين سلك واحد فقط من الاثنين فى مثل هذه الرسومات أما السلك الاخر فيؤخذ على انه متصل بالأرض ويلغى من الرسم . لنترك الآن مناقشة النبيطات الالكترونية ونتحول الى موضوع الامواج الكهرمغناطيسية .

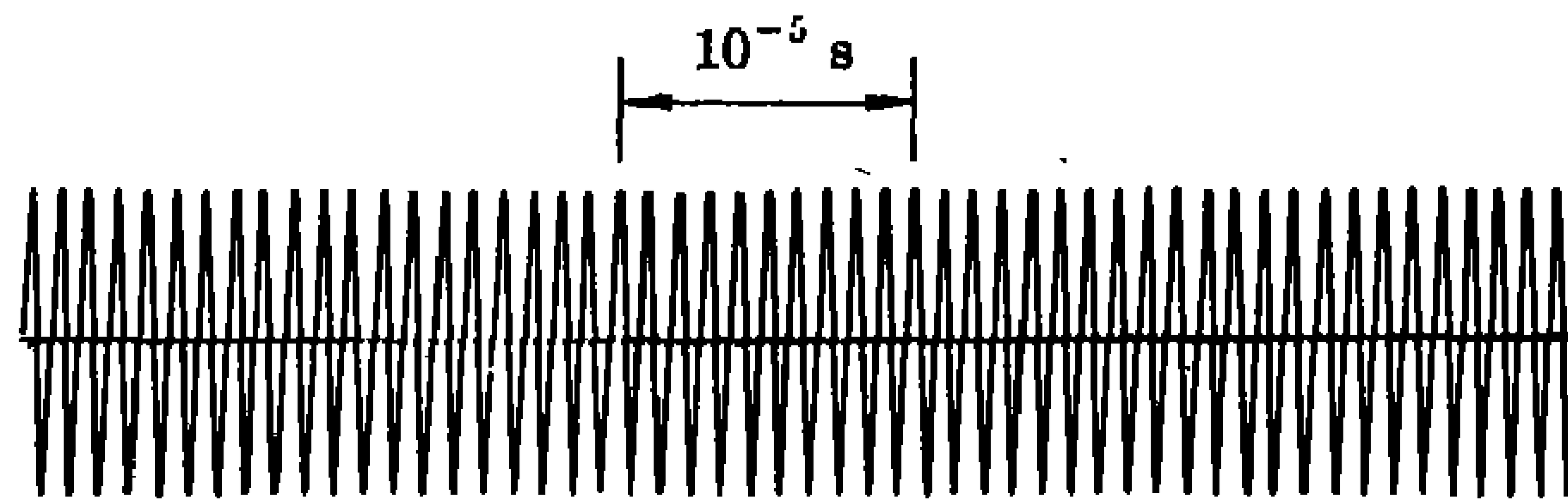
٢٢ - ٥ توليد أمواج اللاسلكى

قبل أن نبدأ دراستنا حول الطريقة التى تنقل بها الاشارات الكهربائية والمغناطيسية خلال الفضاء ، لنناقش قليلا من السمات الفرعية للأمواج اللاسلكية . وعلى الرغم من أن هذه الافكار المبدئية ستعدل وتطور فى أقسام تالية إلا أنها ستمكننا من إستيعاب المبادىء الأبسط فى هذا الموضوع .



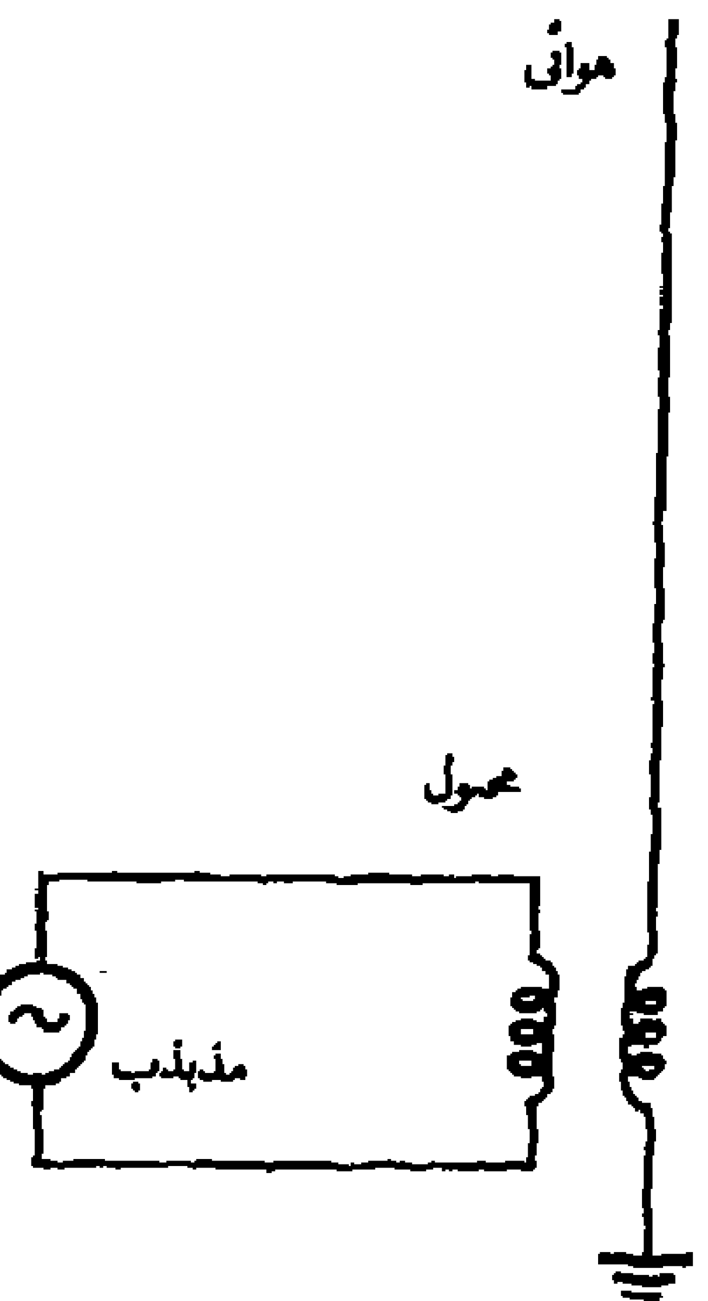
شكل ٢٢ - ١٢
دائرة انبوبة اشعة اكس

يخصص لكل محطة اذاعة تردد لا سلكى معين تعمل عنده وتقع الترددات فيما بين ما يقرب من 500,000 الى 1,700,000 cps لمحطات الاذاعة التجارية العادية سنعتبر الآن محطة حصص لها تردد يبلغ 1,000,000cps وذلك لاغراض المناقشة المبدئية للموضوع . سيكون هذا التردد مبينا على معظم مؤشرات أجهزة الراديو بالرقم 1000 kc/s تستخدم المحطة المخصص لها هذا التردد جهدا مترددا مقداره 1×10^6 cps. ويوضح الشكل ٢٢ - ١٣ رسما بيانيا للعلاقة بين هذا الجهد مع الزمن . يطبق هذا الجهد على الملف الابتدائى لمحول كما هو مبين بالشكل ٢٢ - ١٤ والجهد الناشىء بالحث فى الملف الثانوى للمحـول يستخدم لوضع شحنات على هوائى الارسال لمحطة الاذاعة .



شكل ٢٢ - ١٣
يكون الجهد المتردد المستخدم لتشغيل جهاز الارسال الذى يناقش فى هذا القسم جيبيا ذا تردد يبلغ 10^6 cps.

يمكن اعتبار الهوائى كقطعة طويلة من السلك كما فى الشكل ٢٢ – ١٤ ، وفى حالة محطتنا هذه يشحن الطرف العلوى للهوائى بشحنة موجبة بالنسبة للطرف السفلى 1×10^6 مرة كل ثانية ، وحيث ان جهد الشحن يتردد ، فان الشحنة التى على الهوائى ستنعكس بشكل دائم .



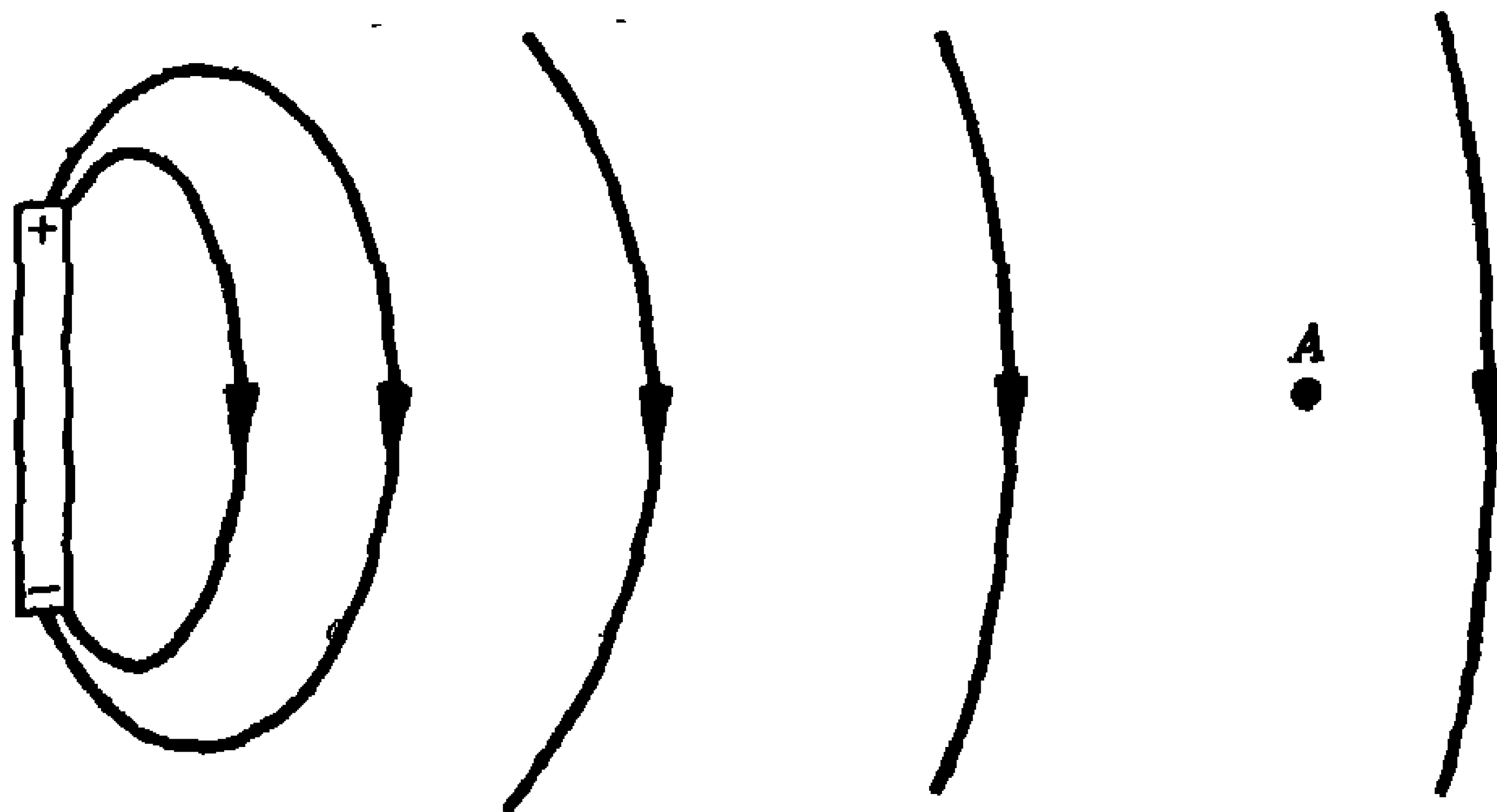
شكل ٢٢ – ١٤
يستخدم مصدر جهد متردد عالى التردد لشحن قمة الهوائى بشحنة موجبة وسالبة بالتناوب

لنعتبر الآن ما يحدث فى اللحظة التى يكون فيها الهوائى موجب الشحنة عند طرفه الأعلى وسالبا عند الأسفل كما هو مصور فى الشكل ٢٢ – ١٥ ، حيث يظهر المجال الكهربائى حول السلك الى حد ما كما هو مبين .

ولكن ، بعد لحظة تالية ينعكس اتجاه المجال لأن شحنة الهوائى ستكون منعكسة بالنسبة للمبينة بالشكل . وبعد لحظة أخرى يعود الهوائى فيشحن بالطريقة المبينة بالشكل ويعود المجال أيضا كما كان. وفى الحقيقة يكون عدد المرات التى ينعكس فيها المجال فى الثانية الواحدة مساويا لضعف تردد الموجة الحاملة لمحطتنا ، 1×10^6

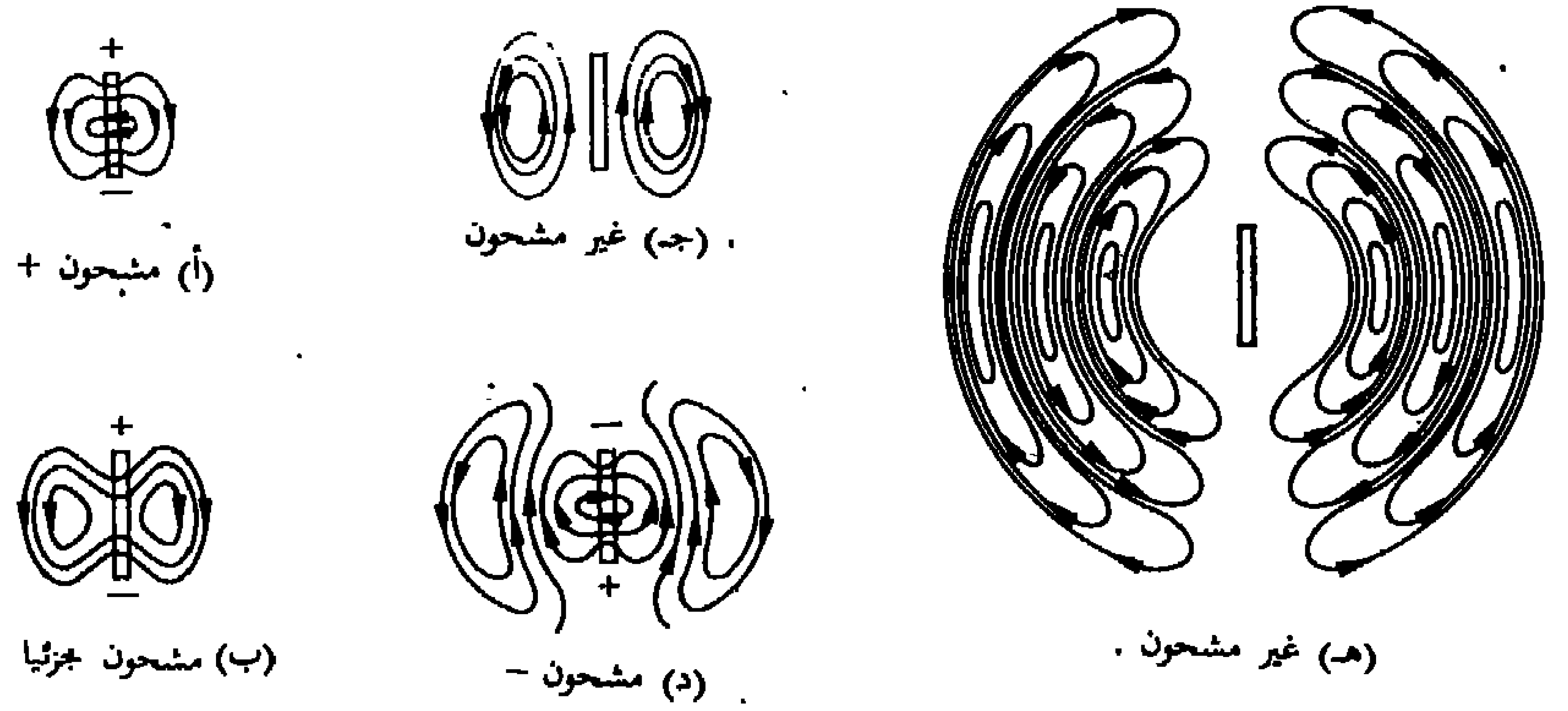
مما سبق يظهر أن مشاهدا على بعد عدة أميال من الهوائى عند النقطة A فى شكل ٢٢ – ١٥ مثلا ، سيلاحظ أن هناك مجال كهربائى قائم عند تلك البقعة . ينتج هذا المجال من الشحنات المستقرة على الهوائى . سيكون المجال ضعيفا جدا طبعا ولكنه سيكون متذبذبا كدالة فى الزمن ، اما تردده فسيكون هو نفس تردد محطة الاذاعة .

لنر الآن كيف يتشكل المجال الكهربائى فى الحيز القريب من الهوائى . يوضح الشكل ٢٢ – ١٦ صورة المجال الكهربائى وهو يتطور مبتعدا عن الهوائى ، فالجزء (أ) يوضح الموقف عند بداية شحن الهوائى . بمرور الوقت تتضاءل الشحنة (الجزء ب) ، فتصبح صفرا (الجزء جـ) ثم تصير سالبة تماما (الجزء د) وفى النهاية ، فى (الجزء هـ) ، يتضح الموقف بعد مرور دورتين عقب الجزء (حـ)



شكل ٢٢ – ١٥
حين تتذبذب شحنة الهوائى جيئة وذهابا ، يتغير المجال الكهربائى عند A بحيث يتجه الى أعلى والى أسفل بالتناوب

افترض أن هوائى الشكل ٢٢ - ١٦ يرسل المجال الكهربائى الى سطح الكرة الأرضية يبين الشكل ٢٢ - ١٧ أ الجانب الأيمن من الشكل ٢٢ - ١٦ د . لو كان سطح الارض ممتدا فى اتجاه محور x ، فان المجال الكهربائى على طول سطح الأرض سيكون كما فى الجزء (ب) و (جـ) من الشكل لاحظ أنه عند النقطتين A ، C يتجه المجال الكهربائى الى أسفل بينما يتجه عند B الى أعلى ولكن المجال الكهربائى الذى يولده الهوائى ينتقل عبر الأرض بسرعة معينة مقدارها v ونتيجة لهذا يتعرض إنسان يقف عند النقطة A لمجال كهربائى يتذبذب وتتحرك موجة المجال الكهربائى الموضح فى الأجزاء (أ) و (ب) و (جـ) نحو اليمين وعندما تمر قمة بالنقطة A يكون المجال متجها لأعلى أما حين يمر بالنقطة A بطن فان المجال يتجه لأسفل .



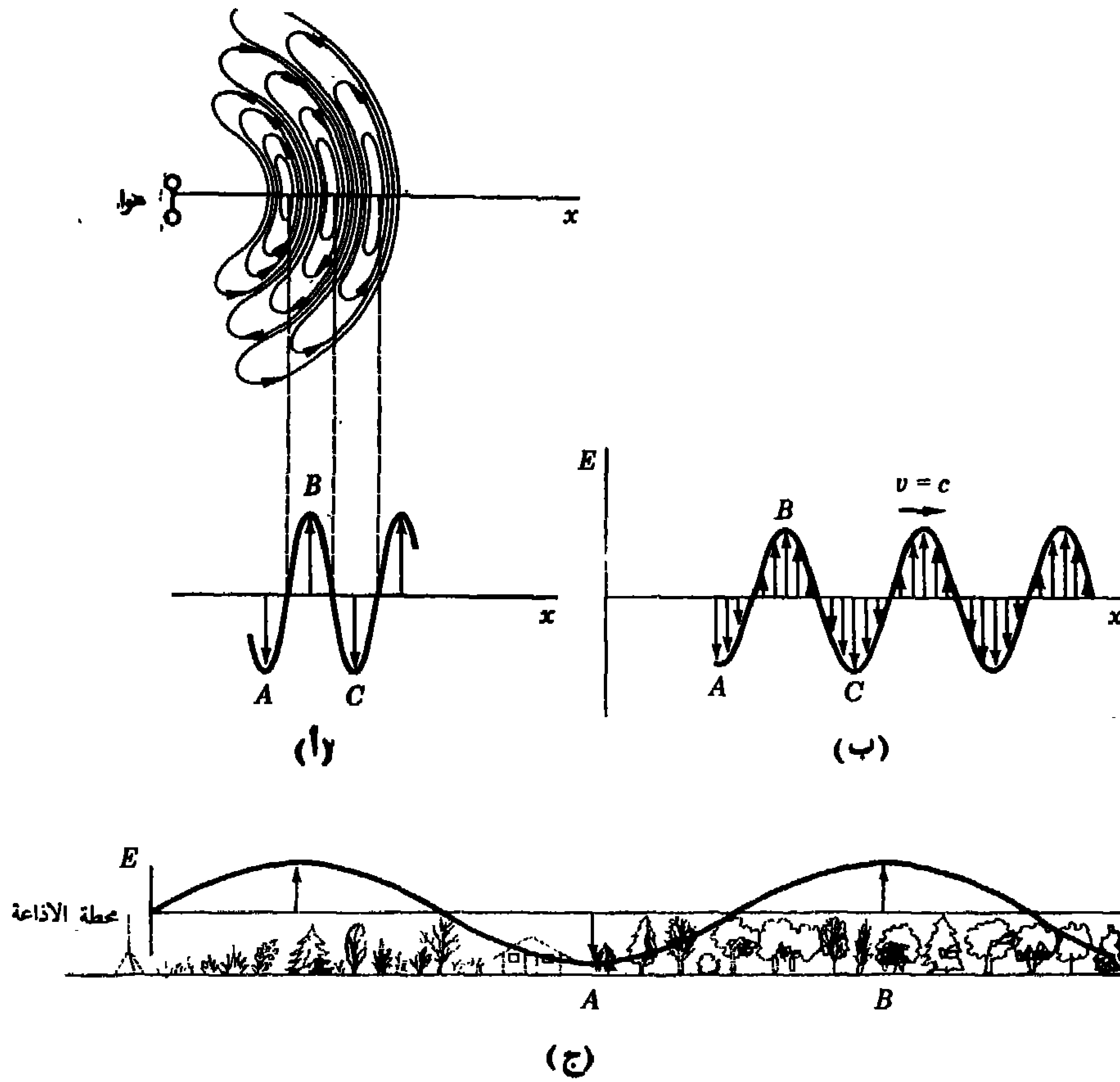
شكل ٢٢ - ١٦
تتحرك المجالات الكهربائية الموضحة مبتعدة عن الهوائى وحين تمر بنقطة بعيدة فان المجال عند تلك النقطة يعكس اتجاهه بتردد هو نفسه. تردد محطة الارسال

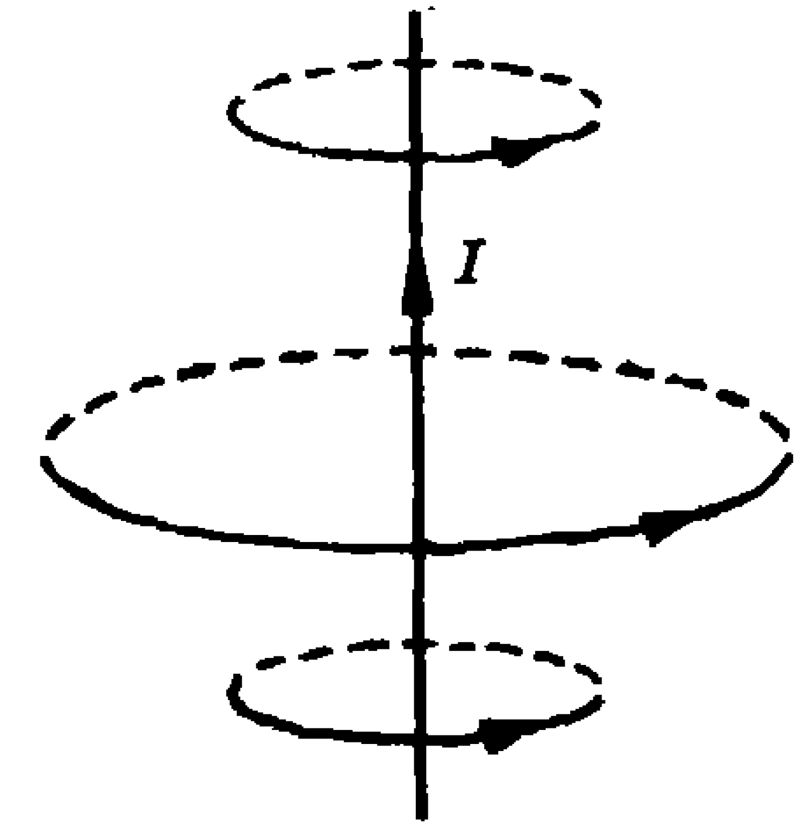
من هنا نرى أن كل نقطة على سطح الأرض ستتعرض لمجال كهربائى متذبذب بتردد يتساوى مع تردد المصدر وهو الشحنة المتذبذبة على هوائى محطة الاذاعة .

تخضع موجه المجال الكهربائى التى يبعث بها المصدر لنفس العلاقة التى أوجدناها للأمواج الأخرى كلها ، فيرتبط الطول الموجى λ والتردد f والسرعة v بالعلاقة $\lambda = v/f$. يبلغ تردد الموجة التى ترسلها محطة الاذاعة 10^6 Hz ، فاذا علمت السرعة v التى تتحرك بها موجة المجال الكهربائى لأمكن تعيين الطول الموجى لها . وقبل أن نناقش سرعة هذه الموجات سنتوقف لحظة عند مظهر آخر للاشارة المرسلة من الهوائى .

هناك موجه مجال مغناطيسى يرسلها الهوائى بالاضافة الى موجة المجال الكهربائى ، وهذه الموجه تنتج من الحقيقة القائلة بأن تغير الشحنات على الهوائى يجعل تيارا يمر فى سلك الهوائى ، وقد رأينا سابقا أن هذا التيار يسبب مجالا مغناطيسيا يحيط

شكل ٢٢ - ١٧
تنتقل موجة المجال الكهربائى مبتعدة عن الهوائى بسرعة $v = c$





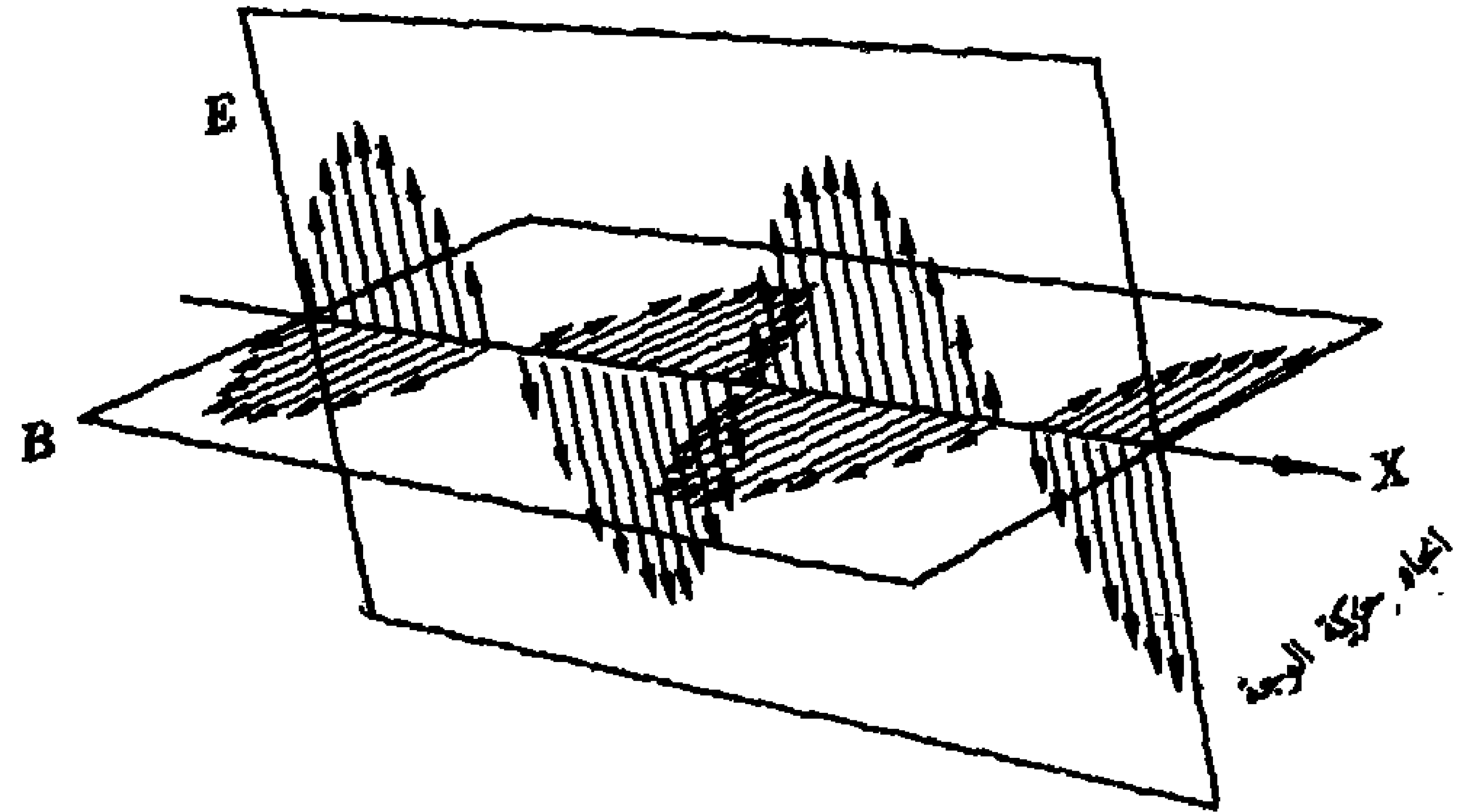
شكل ٢٢ - ١٨
يحيط مجال مغناطيسى بالهوائى

بالهوائى كما فى الشكل ٢٢ - ١٨ . لاحظ أن المجال المغناطيسى يتخذ اتجاها متعامدا مع المجال الكهربائى . كما أنه يتذبذب فى الاتجاه بنفس تردد محطة الاذاعة . لذا نرى أن مشاهدا يبعد عدة أميال عن الهوائى سيتعرض ليس فقط لمجال كهربائى متذبذب ولكن أيضا لمجال مغناطيسى متعامد مع المجال الكهربائى ويتذبذب معه . وهذا المجال الكهربائى والمغناطيسى الموحد هو ما نسمية موجه اللاسلكى الكهرمغناطيسية ك م للمحطة .

يمثل الشكل ٢٢ - ١٩ موجه (ك م) الموحدة هذه ، لاحظ أن المجال الكهربائى E متعامد مع المجال المغناطيسى B وكلتا الموجتان متطاورتان (والنقطة الاخيرة ليست واضحة ولكنها نتاج حسابات مفصلة) .

وقد أمكن التنبؤ بوجود أمواج (ك م) اللاسلكية من حسابات نظرية وذلك قبل ظهور أول جهاز للراديو بسنوات عديدة . وقد كان هذا التنبؤ على يد فيزيائى لامع هو جيمسى كلارك ماكسويل فى ١٨٦٥ ، فقد أمكنه أن يصيغ رياضيا القوانين التى

اكتشفها فارادای والعلماء الأخرون فی مجال الكهربية . ويبلغ عدد معادلاته الشهيرة معادلات ماكسويل ، أربعة معادلات ، وباستخدامها أوضح ماكسويل أن أمواج اللاسلكى يجب أن توجد.وقد وجد نظريا أن سرعة هذه الأمواج فى الفراغ يجب أن تكون 2.998×10^{8} m/s (سنأخذ هذه السرعة على أنها 3×10^{8} m/s وذلك للأغراض العملية وسنمثلها بالحرف c .



شكل ۲۲ - ۱۹ يرسل الهوائى المتذبذب موجه مجال مغناطيسى عمودية على موجة المجال الكهربائى وترى لقطة لهذه الموجة الكهرمغناطيسية (ك م) على طول خط متعامد مع مركز الهوائى .

وقد أدهشت هذه السرعة لأمواج اللاسلكى والتى تنبأ بها ماكسويل معاصرية (تذكر أنه فى ذلك الوقت لم تكن مولدات أمواج اللاسلكى قد اخترعت بعد) . وقد كانت السرعة التى أوجدها مساوية تماما للسرعة المقاسة للضوء وقد استنتج ماكسويل من هذه النتيجة أن أمواج الضوء هى صورة من أمواج (ك م) .

وقبل أن نغادر هذا القسم نود أن نشير الى حقيقة اعتبرت ضمنا :تنتقل أمواج(ك.م)فى الفراغ ولا يلزم وجود أية مادة لانتشارها . وعلى عكس أنواع أخرى من الموجات التى درسناها فان هذه الامواج عبارة عن اهتزاز مجال وليس اهتزاز جسم مادى .

مثال توضيحى ۲۲ - ۱ تعتبر أقدم محطة اذاعة فى الولايات المتحدة هى محطة KDKA فى مدينة بيتسبرج التى بدأت عملها عام ۱۹۲۰ وهى تعمل عند تردد يبلغ 1.02×10^{6} Hz ما هو الطول الموجى لموجات (ك م) الخاصة بها ؟

طريقة الحل : نعرف أنه لجميع الأمواج تنطبق العلاقة $\lambda = v/f$. وفى هذه الحالة $v = c = 3\times10^{8}$ m/s ، $f = 1.02\times10^{6}$ Hz بالتعويض نجد أن $\lambda = 294$ m

٢٢ - ٦ طيف الأمواج الكهرمغناطيسية

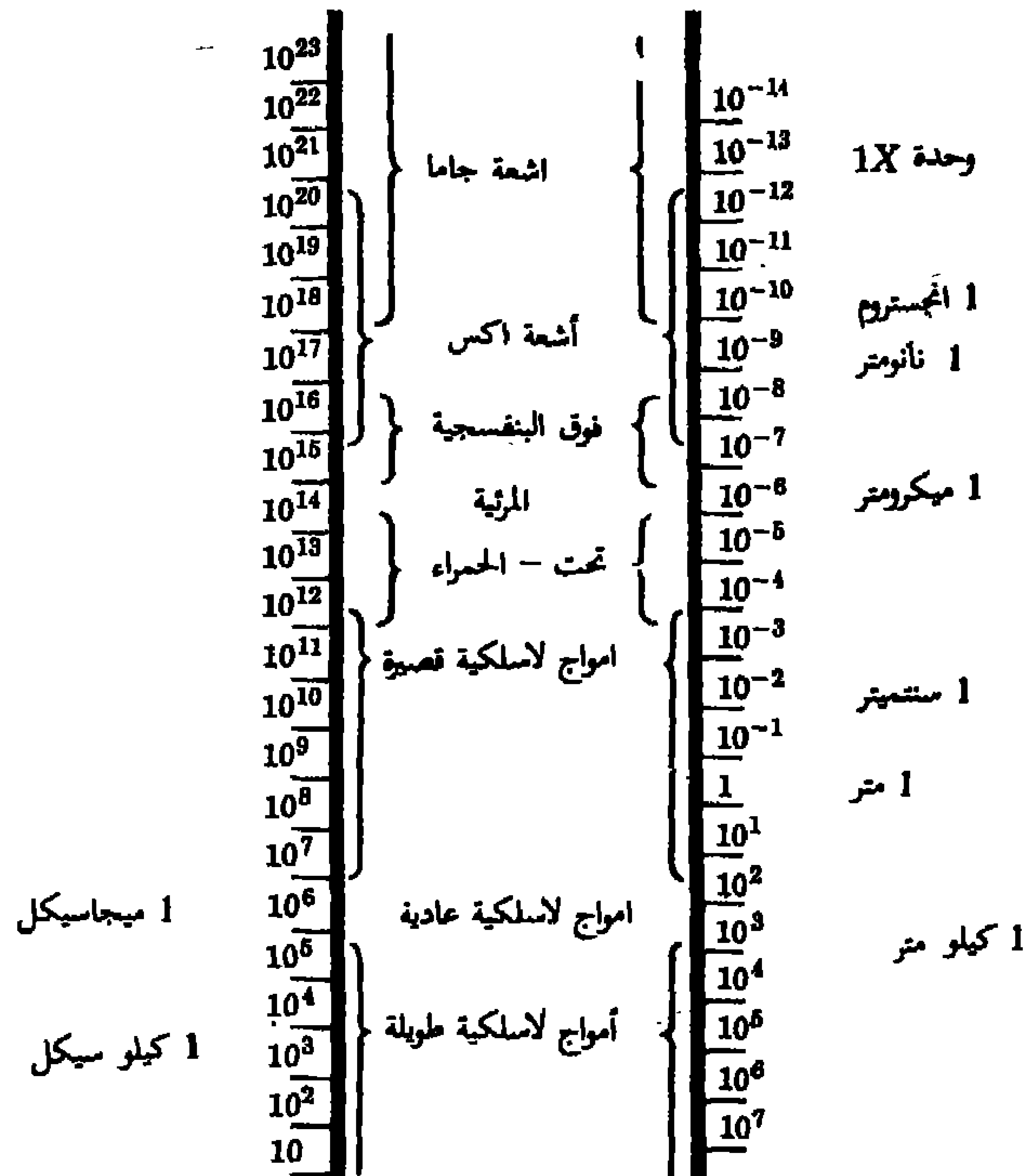
تنتقل موجات (ك م) فى الفراغ بسرعة قدرها $c = 3 \times 10^{8} m/s$ كما رأينا فى القسم السابق . ولموجات اللاسلكى العادية أطوال موجية تصل الى عدة مئات من الامتار فى الطول . وقد استنتج ماكسويل أن أمواج الضوء هى أيضا أمواج (ك م) .

وقد أبدت الابحاث المتتالية استدلال ماكسويل على أن أمواج الضوء ليست الا امواج (ك م) . على أن الاطوال الموجية للضوء – كما سنرى فى فصول قادمة – صغيرة الى حد بعيد . اذ تقع الأطوال الموجية لأمواج الضوء بالقرب من 0.0000005 m أو 5×10^{-7} m ويعتمد الطول الموجى المحدد للضوء على لونه ، فالضوء الاحمر له طول موجى قرب 6.5×10^{-7}m بينما للضوء الازرق قرب 4.3×10^{-7}m

وأى شخص يلاحظ هذا الفرق الكبير بين الأطوال الموجية لموجات اللاسلكى والضوء وكلاهما كهرمغناطيسى ، قد يتساءل اذا كان ثمة صور موجية أخرى فيما بين هذين النوعين . والحقيقة ان هناك أمواج أخرى . فنحن نستطيع مثلا انتاج أمواج لاسلكى ذات طول موجى أقصر بكثير من 100 m وذلك باستخدام مذبذبات عالية التردد جدا جدا ، ومن هذا النوع لدينا أمواج الرادار (الأمواج الدقيقة) ويمكن جعل أطوالها تصل الى 0.01 m. كما أننا نعلم أن الاشعاع الحرارى يتكون من أمواج (ك م) تقع أطوالها الموجية فى الوسط بين أمواج الرادار وأمواج الضوء . وفى الحقيقة ليست الامواج الحرارية ذات الطول الموجى القصير سوى ضوء تحت الاحمر كما قد يعلم معظم القراء .

يوضح الشكل ٢٢ – ٢٠ الامتداد الضخم للاطوال الموجية لأمواج (ك م) التى تمتد من موجات اللاسلكى حتى أمواج الضوء ولا تتوقف الاشعاعات الكهرمغناطيسية عند الضوء الأزرق اذ أن هناك أمواج كهرمغناطيسية أقصر من ذلك . وكلنا على المام بالأمواج الأقصر التالية وهى الاشعاع فوق البنفسجى ، اما أشعة اكس فهى لازالت أقصر أيضا من ذلك . هناك نوع آخر من الاشعاع الصادر من المواد المشعة ونعنى به أشعة جاما وهى بالضرورة مثل اكس الا أن طولها الموجى أقصر .

يتضح اذن أن الأمواج (ك م) تتباين بشدة اعتمادا على أطوالها الموجية ، وسنكرس الفصول القليلة القادمة من هذا الكتاب لدراسة مدى الأطوال الموجية القصيرة وهو الضوء العادى . وسندرس أنواعا أخرى من الاشعاع فى الطيف (ك م) فى فصول تالية .

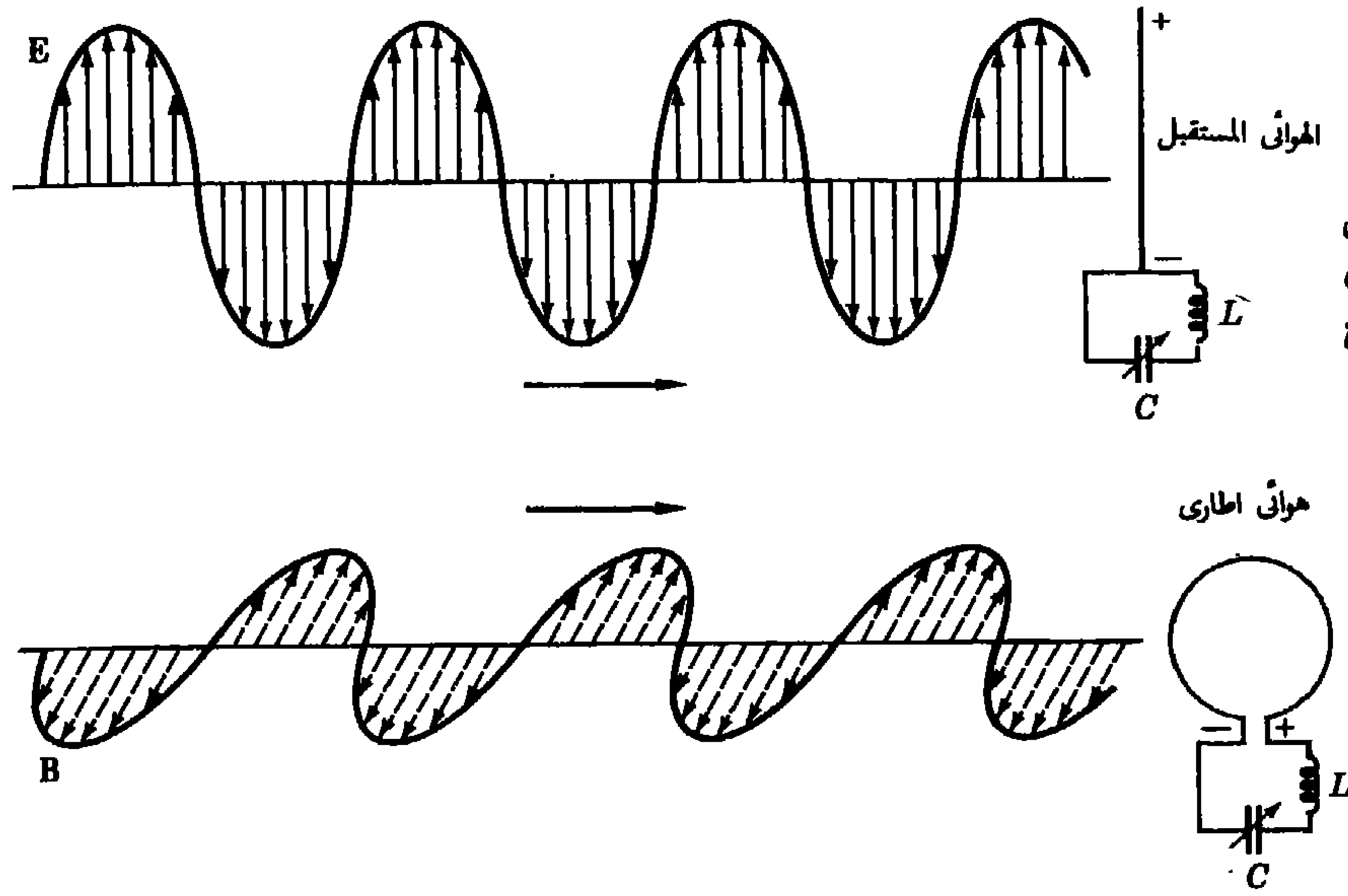


شكل ٢٢ – ٢٠
الطيف الكهرمغناطيسى

٢٢ – ٧ استقبال الأمواج اللاسلكية

يقوم جهاز الارسال اللاسلكى بتغطية المنطقة المحيطة به بمجال كهربائى يهتز بتردد محدد كما رأينا . فاذا امسكنا بقطعة من السلك المستقيم فى هذا المجال ، فان الالكترونات فى ذلك السلك ستتحرك تحت تأثير المجال الكهربائى المتذبذب . ومن الطبيعى أن المجال الكهربائى سيكون ضعيفا جدا عند مسافة تبعد أميالا كثيرة عن المرسل.ولكن اذا استعمل نظام كشف حساس لامكنه قياس حركة الشحنات فى السلك نتيجة لوجود المجال ويعتبر جهاز الراديو نبيطة بنيت لهذا الغرض .

افترض أن المجال الكهربائى يتذبذب رأسيا كما هو مبين فى الجزء الأعلى من شكل ٢٢ – ٢١.سيقوم المجال بفصل الشحنات فى الهوائى الرأسى للراديو ، فعندما يتجه المجال الى أعلى ، مثلا فان قمة الهوائى ستكون موجبة الشحنة بينما طرفها الأسفل سالب الشحنة . وبسبب هذا ، بالطبع ، شحنة على المكثف C . على أن هذه الشحنة سرعان ما تفيض من المكثف خارجة لأنه بعد نصف دورة سيكون اتجاه المجال الى أسفل وعلى الشحنة الموجودة على الهوائى والمكثف أن تنعكس . وبعد نصف



شكل ٢٢ – ٢١
يعمل هوائى الراديو مثل مصدر للجهد وذلك لان موجة اللاسلكى المارة بجوارة تستحث فيه فرقا للجهد

دورة آخر يقوم الهوائى بشحن المكثف كما كان فى الأصل . من هذا نرى أن الهوائى يستمد الطاقة من موجة اللاسلكى ثم يقوم باعطائها للمكثف .

طريقة انتقاء التردد

ولو أن قيمة المكثف ضبطت بحيث كان التردد الطبيعى لدائرة LC هو نفسه تردد محطة الاذاعة ، فان الدائرة سوف ترن تحت التأثير الحافز للهوائى ، ونتيجة لهذا تتم فى دائرة LC استجابة ضخمة لتأثير أمواج اللاسلكى التى تناغمت الدائرة معها . وبهذا يصبح من الممكن موالفة جهاز الراديو ليستقبل محطة بعينها . ستقوم الدائرة الرنانة ، اذن ، باظهار جهد متذبذب عبر C يكون متناسبا تقريبا مع جهد الخرج لمحطة الاذاعة ، وهو يتكون من موجة حاملة مضمنة بأثر النظام الميكروفونى للمحطة . ولكن الجهد عبر C سيكون صغيرا الى حد بعيد الا بالنسبة للمحطات القريبة ولهذا السبب تقوم معظم اجهزة الراديو بتضخيم هذا الجهد عن طريق دوائر الكترونية معقدة .

لا تستعمل معظم أجهزة الراديو التى تحمل المجال الكهربائى المهتز . وتستقبل بدلا منه الاشارة المرسلة بجزء المجال المغناطيسى المهتز من موجة (ك م) ، فكما يوضح الجزء الاسفل من شكل ٢٢ – ٢١ يستخدم هوائى اطارى لكشف الجزء المغناطيسى من الموجة . فعند مرور الموجة خلال الهوائى ، يقوم تدفقها المتغير بحث ق.د.ك فى الاطار.وتستخدم ق.د.ك هذه لحفز الدائرة الرنانة

مثلما حدث فى الحالة السابقة . يتكون الهوائى الاطارى عادة من ملف حول قضيب مصنوع من مادة ذات مغناطيسية حديدية ، الحديد . ولو أنك نظرت داخل جهاز صغير للراديو لرأيت هذا القضيب بسهولة .

ويظهر الهوائى الاطارى دائما خواص اتجاهية . فلو أن الراديو كان متجها بحيث كان الهوائى بالنسبة للمجال كما هو مبين فى شكل ٢٢ – ٢١ فان الاستقبال يكون أحسن ما يمكن لماذا ؟ ولكن لو أن الهوائى أدير °90؛ فان الاستقبال يكون عند أدنى حد له . ويمكن استخدام هذه الخاصية للهوائى فى تحديد موقع مصدر الامواج (ك.م) كيف ؟

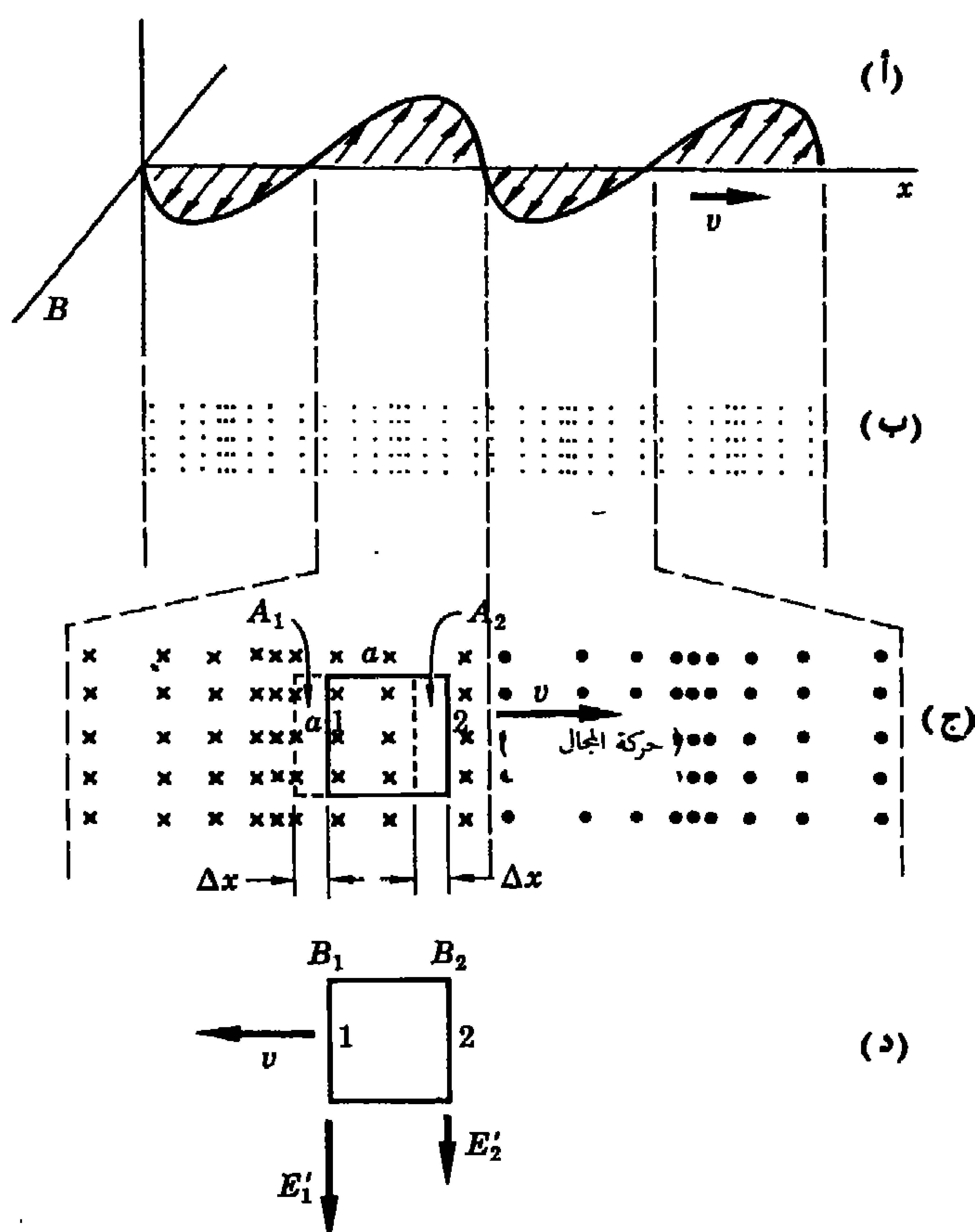
٢٢ – ٨ العلاقة بين E و B فى الأمواج الكهرمغناطيسية *

سنستخدم فى هذا القسم قانون فارادای الخاص بـ ق.د.ك المنتجة بالحث وذلك لنحصل على علاقة بين شدة المجال الكهربائى E وشدة المجال المغناطيسى B فى موجة كهرمغناطيسية . لنحصر انتباهنا أولا فى جزء المجال المغناطيسى من الموجة المنتشرة على طول المحور x. ويوضح الشكل ٢٢ – ٢٢أ « لقطة » لهذه الموجة عند لحظة معينة وذلك على شكل رسم بيانى أما مقطع الموجة ففى الجزء (ب) . نعلم من الأقسام السابقة أن هذه الموجة تنتقل خلال الفراغ – وفى حالتنا هذه الى اليمين على طول المحور x • وبانتقال المجال المغناطيسى الى اليمين ، فانه يسبب تغيرا فى التدفق المغناطيسى خلال اطار كالموضح فى الجزء (جـ) من الشكل . وقد افترض أن الاطار له مقاومة لا نهائية بحيث لا يمر تيار خلاله . سنقوم الآن بحساب ق.د.ك المنتجة بالحث فى هذا الاطار بطريقتين ومن ثم نحصل على معلومات تتعلق بالموجة (ك.م) .

اعتبر الآن ما يحدث للتدفق خلال الاطار فى شكل ٢٢ – ٢٢ جـ خلال الفترة القصيرة Δt التى تستغرقها الموجة لكى تنتقل مسافة صغيرة Δx (نشير الى هذه الازاحة فى الشكل بالاشارة الى وضع الاطار الجديد « على الموجة » على انه هو المساحة المزاحة داخل الخطوط المنقطة . وبالطبع فان الاطار يظل فى الحقيقة فى نفس المكان والموجة هى التى تتحرك) بما أن المسافة Δx هى فى الحقيقة أصغر بكثير عما هى عليه فى الرسم فان قيمة B داخل المساحة المستطيلة A_1 هى بالتقريب B_1 وتبلغ B_2 فى A_2 . عند تحرك الموجه فان التدفق خلال المساحة A_2 وبالتحديد B_2A_2 قد فقد من الاطار بينما التدفق خلال A_1 قد اكتسب وعليه يصبح لدينا :

$$\Delta\phi = \text{كسب التدفق خلال الاطار} = B_1A_1 - B_2A_2 \qquad (٢٢ - ١)$$

* الاقسام من ٢٢ – ٨ الى ٢٢ – ١٠ يمكن تجاوزها دون فقد السياق .



شكل ٢٢ – ٢٢
يوضح الجزءان (أ) ، (ب) أن القسم المغناطيسى من الموجه الكهرمغناطيسية عند لحظة معينة يتحرك الى اليمين بسرعة v حدثت فى (حـ) ازاحة الاطار الى اليسار على طول الموجة وذلك حين انتقلت الموجة الى اليمين ويستحث هذا مجالات كهربائية E'_1 ، E'_2 كما هو مبين فى (د)

على أن كل من A_1 و A_2 مساو للكمية $a\,\Delta x$ ولكن حيث أن Δx هى مجرد المسافة التى تنتقلها الموجة فى زمن مقداره Δt فان Δx تعطى بالكمية $v\,\Delta t$ حيث v هى سرعة الموجة . بالتعويض عن هذه الكمية فى المعادلة (٢٢ – ١) نجد ،

$$\Delta\phi = (B_1 - B_2)v\,\Delta t\, a \qquad \text{أو} \qquad \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = av(B_1 - B_2)$$

وحسب قانون فاراداى فان هذه الكمية هى ببساطة ق.د.ك المنتجة بالحث فى الاطار ومن ثم ،

ق. د. ك = $av(B_1 - B_2)$ (٢٢ – ٢)

ويمكنك بسهولة اثبات أن ق.د.ك تتجه ضد عقارب الساعة فى الاطار .

لنحسب الآن ق.د.ك بطريقة أخرى . افترض أننا كنا ننتقل فعلا مع موجة (ك.م) خلال الفراغ أى أن الموجة ستكون ساكنة بالنسبة لنا ، أى فى مناط اسنادنا وبهذا يكون المجال المغناطيسي ايضا ساكنا ولا يتغير . ولكن الاطار سيبدو كما لو كان متحركا الى اليسار بسرعة v فى الشكل ٢٢ – ٢٢ حـ . وكما تعلمنا فى الفصل العشرين فان السلكين 1 ، 2 سيكون بين اطرافها فرق للجهد نتيجة لحركتهما خلال المجال المغناطيسى . تتعرض الشحنات الموجبة فى السلكين لقوة تتجه الى الطرف الأسفل للسلك وذلك بسبب حركتهما فى المجال وبهذا تكون ق.د.ك المنتجة بالحث متجهة الى الطرف الأسفل من الأسلاك . وتفيدنا المعادلة (٢٠ – ٧) بأن ق.د.ك المنتجة بالحث فى سلك طوله a هى Bva.ولما كانت ق.د.ك. المنتجتين بالحث فى السلكين 1 ، 2 تعاكس كل منهما الأخرى فى الاطار ، فان ق.د.ك المنتجة بالحث فى اتجاه ضد عقارب الساعة داخل الاطار تكون

ق.د.ك $= av(B_1 - B_2)$ (٢٢ – ٣)

وهى مطابقة للنتيجة التى توصلنا اليها فى المعادلة (٢٢ – ٢)

تتضح أهمية الحسابات التى أدت الى المعادلة (٢٢ – ٣) حين نعتبر حقيقة أن ق.د.ك المنتجتين بالحث فى السلكين 1 ، 2 هما نتيجة للقوى المؤثرة على الشحنات الموجبة فى السلكين وحيث أن ق.د.ك او فرق الجهد عبر السلك هو القوة المؤثرة على وحدة الشحنات الموجبة ، أى E مضروبة فى طول السلك ، فان

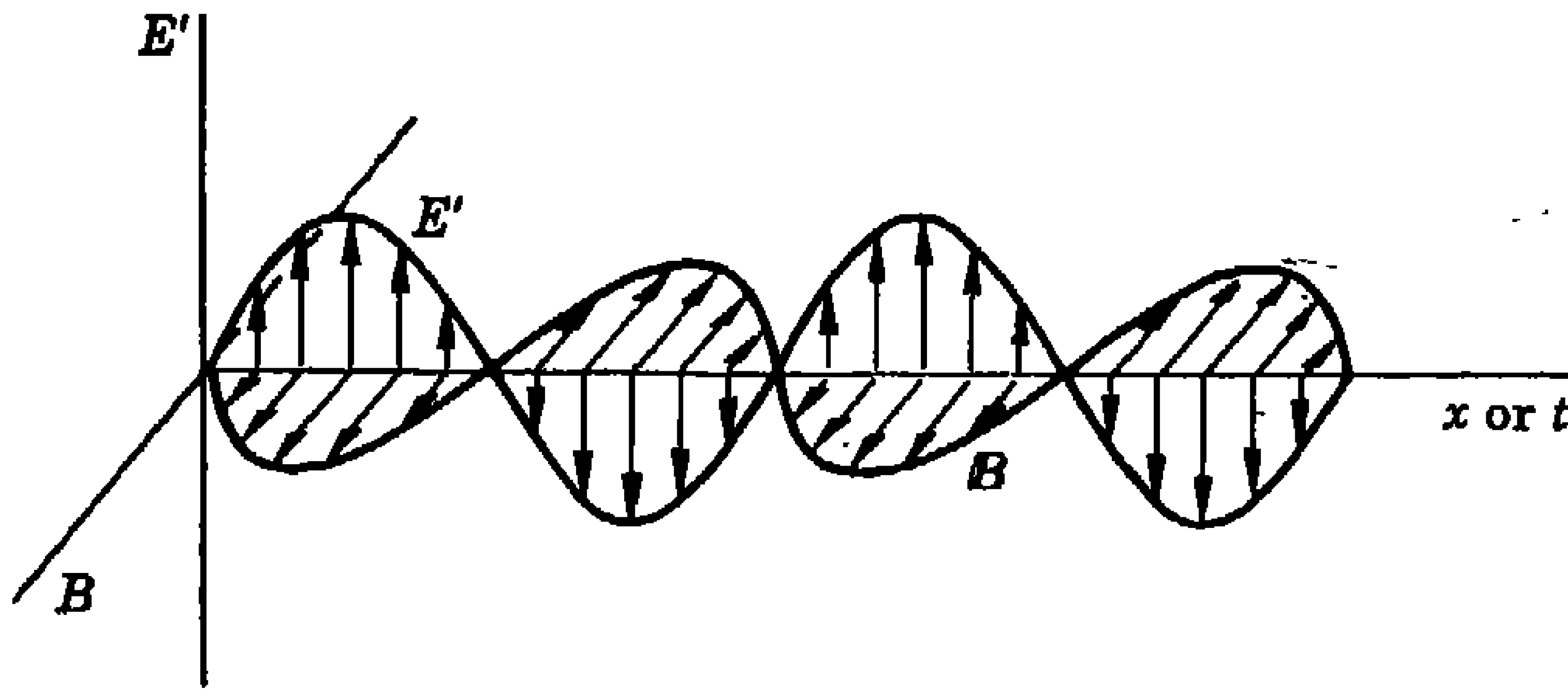
$$aE'_1 = avB_1 \quad \text{و} \quad aE'_2 = avB_2$$

أو

$$E'_1 = vB_1 \quad \text{و} \quad E'_2 = vB_2 \qquad (\text{٢٢ – ٤})$$

حيث يوضح الشكل ٢٢ – ٢٢ (د) اتجاه كل من E'_1، E'_2 ومن هنا نرى أن مجالا مغناطيسيا B يتحرك بسرعة v يؤدى الى ظهور مجال كهربائى E' عمودى عليه ، وقيمة E' تتناسب مع قيمة B وتعطى بالمعادلة $E' = vB$

يمثل الشكل ٢٢ – ٢٣ اعادة لرسم موجة B الاصلية التى كانت فى الشكل ٢٢ – ٢٢أ . بحيث رسم على نفس الشكل المجال الكهربائى E' المنتج بالحث وذلك باستخدام النتائج التى توصلنا اليها منذ قليل ، وحيث أن $E' = vB$ فيصبح على كلا المجالين أن يصلا الى قيمتهماالعظمى معا ويصلان للصفر معا أيضا . وعلى الرغم من انهما متعامدين الا أنهما متطاوين تماما . ومن الواضح أن هناك تشابها بين هذا الشكل وذلك المبين فى الشكل ٢٢ – ٢٠ لموجه (ك م) وهذا يقودنا الى الشك فى



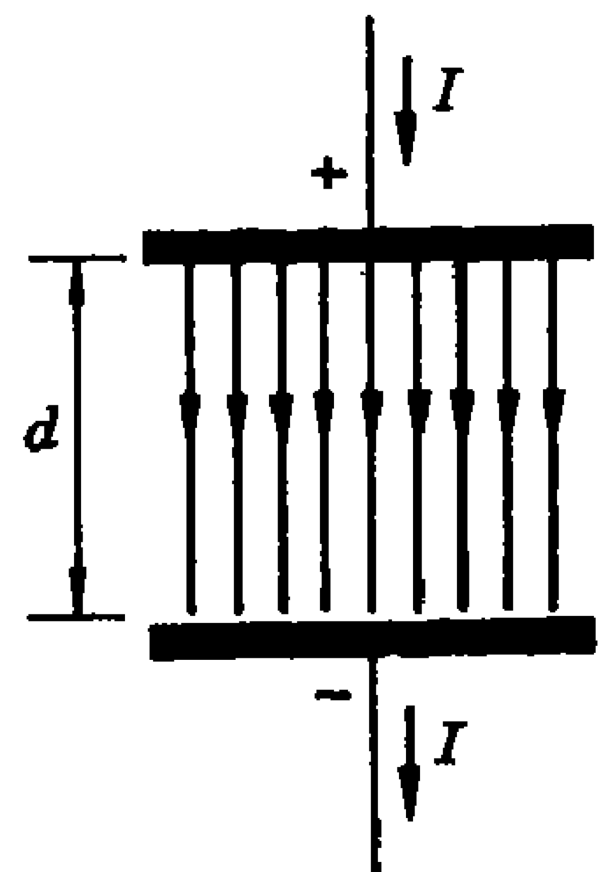
شكل ٢٢ - ٢٣
الجزء المغناطيسى من موجة (ك.م) تنتقل الى اليمين ويقوم بتوليد موجة مجال كهربائى E' كما هو مبين

أن جزء المجال الكهربائى من موجة (ك.م) قد تولد - بشكل ما على الأقل - بواسطة جزء المجال المغناطيسى من الموجه وهى تنتقل خلال الفراغ ، وسيجد هذا الشك تأكيدا أقوى من النتائج التى سنحصل عليها فى القسم التالى .

٢٢ - ٩ المجالات المغناطيسية المستحثة بتغيير المجالات الكهربائية

رأينا فى القسم السابق أن جزء المجال المغناطيسى من موجه (ك . م) يولد مجالا كهربيا ينتقل معه دائما ، وهذا مثال اخر على قانون فاراداى للحث الذى ينص على أن المجال المغناطيسى المتغير يمكن أن يؤدى الى ظهور ق . د . ك مما يعنى تولد مجال كهربائى أثناء العملية . وحيث أن المجال المغناطيسى المتغير يؤدى الى مجال كهربائى فانه يصبح من حقنا التساؤل عما اذا كان المجال الكهربائى المتغير يؤدى هو الآخر الى مجال مغناطيسى . وهذا يعنى أن المجال الكهربائى لابد وأن يعمل كتيار وذلك لأن كل المجالات المغناطيسية التى قابلناها حتى الآن كانت متولدة من حركة الشحنة . لهذا سنبحث أثر المجال الكهربائى المتغير لنرى كيف يمكنه أن يسلك سلوك تيار .

شكل ٢٢ - ٢٤
يتسبب التيار I الذى يشحن المكثف فى تيار مكافىء خلال الحيز بين اللوحين كما هو مبين ، وهذا التيار المكافىء يتناسب مع معدل تغير التدفق الكهربى المار بين اللوحين .



يبين الشكل ٢٢ - ٢٤ موقفا فيزيائيا يوجد بين مجال كهربائى وتيار بطريقة مباشرة فالسلك المبين هناك وهو مستقم وطويل يحمل تيارا I الى المكثف ويقوم بشحنه . ومن الطبيعى ألا يستمر هذا التيار طويلا ، لان التيار يجب أن يضمحل الى الصفر حينما تكتمل شحنة المكثف . ولكن التيار يكون I فى لحظة ما أثناء عملية الشحن . وسنناقش ما يحدث عند تلك اللحظة . وسنتجاهل التأثيرات التهدبية عند حافة المكثف وسنعتبر أن E ، المجال الكهربائى ، منتظما بين اللوحين .

حيث أن فرق الجهد بين اللوحين هو Ed. كما رأينا فى الفصل السادس عشر ، وحيث أن الشحنة Q على مكثف سعته C تعطى بالعلاقة $Q = CV$. فانه عند لحظة معينة يكون لدينا :

$$Q = CEd$$

وبعد فترة Δt ستصبح الشحنة $Q + \Delta Q$. أما المجال فسيزيد الى $E + \Delta E$ ومن ثم :

$$Q + \Delta Q = C(E + \Delta E)d$$

بطرح المعادلة الأولى من الثانية نصل الى :

$$\Delta Q = C\,\Delta E\,d$$

اذا قسمنا كلا الطرفين على الزمن الذى استغرقه التغيير Δt ، وأحللنا مكان C قيمتها المعطاة فى الفصل السابع عشر وهى $\varepsilon_0(A/d)$. حيث A مساحة اللوح ε_0 هى مجاوزية الفراغ الحر وتساوى $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/(N)(m^2)$

فنجد أن $$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon_0 A \frac{\Delta E}{\Delta t} \qquad (٢٢ - ٥)$$

وحيث أن E يمكن تصورها على أنها عدد خطوط المجال الكهربائى فى وحدة المساحات بنفس الطريقة التى تكون فيها B هو عدد خطوط المجال المغناطيسى خلال وحدة المساحات ، فان المقدار AE يسمى دائما **تدفق** E خلال مساحة معينة ويرمز له بالرمز ϕ_E والرمز السفلى E ضرورى حتى لا يحدث خلط بين التدفق الكهربائى والتدفق المغناطيسى $\phi = BA$ وعلى أية حال فان $A\,\Delta E$ هو التغير فى التدفق الكهربائى خلال مساحة المكثف ولهذا يمكن كتابة المعادلة (٢٢ - ٥) على الصورة التالية :

$$I = \varepsilon_0 \frac{\Delta \phi_E}{\Delta t} \qquad (٢٢ - ٦)$$ **تكافؤ تدفق كهربائى متغير وتيار**

حيث أستفيد من الحقيقة القائلة بأن التيار هو $\Delta Q/\Delta t$

تشير المعادلة (٢٢ - ٦) الى أن التدفق الكهربائى المتغير والناشىء عن مجال كهربائى متغير يكافىء تيارا حقيقيا ينتقل فى السلك ولهذا نستدل على مايلى :

يؤدى المجال الكهربى المتغير الى تيار مكافىء يمكن الحصول على قيمته من المعادلة (٢٢ - ٦) . ويقوم هذا التيار المكافىء بدوره بتوليد مجال مغناطيسى مثلما يفعل ذلك أى تيار حقيقى ، ولايجاد ذلك المجال المغناطيسى يمكن استخدام قانون أمبير للدوائر الذى نوقش فى الفصل التاسع عشر ، حيث وجد أنه لو اخترنا مسارا مقفلا يبلغ طوله الكلى $l = l_1 + l_2 + l_3 + \cdots + l_n$ فان المعادلة التالية تنطبق :

$$\Sigma(B_{\parallel} l)_n = (\mu_0)\ (\text{كل التيار المحاط بمسار مقفل})$$

يجب أن يكون المسار مكونا من الاطوال l_1 ، l_2 ، ......، l_n بحيث ان $B_\parallel$ تكون بالضرورة ثابتا فى كل طول . تدل الجهة اليسرى من هذه المعادلة على أننا أخذنا مركبة B الموازية لكل طول ثم نضربها فى الطول ثم نجمع كل هذه الحاصلات لكل الاطوال التى تكون العروة أو المسار المقفل . يساوى هذا المجموع كل التيار الذى يسرى خلال العروة مضروبا فى μ_0. ، نستدل مما قيل بالنسبة للتيارات المكافئة الناتجة من تغير المجالات الكهربائية ان التيارات المكافئة يجب أن تؤخذ هى الأخرى فى الاعتبار عند كتابة التيار المحاط بالعروة .

ان افتراض التدفق الكهربائى يعمل تماما مثل تيار له قيمة تعطى بالمعادلة (٢٢ — ٦) ويسرى فى نفس الاتجاه ، يعتبر أحد الفروض الأساسية التى قدمها ماكسويل عند كتابة معادلاته الشهيرة . وقد كانت مبرراته لعمل هذا الفرض غاية فى البساطة : لم يكن ممكنا التوفيق بين نتائج معادلاته ونتائج التجارب بدون هذا الفرض . وعلى الرغم من أنه أعطى هذا الفرض تبريرا حدسيا ، كما ذكرنا ، فانه بالتحليل الأخير لا يمكن تبرير الفرض الا باختباره بالتجربة وحدها .

وقد كانت السرعة المقاسة للضوء هى النتيجة التجريبية التى أعطت ثقلا كبيرا فى تبرير مبدأ التيار المكافىء.وسرعة الضوء يمكن التنبؤ بقيمتها بدقة باستخدام مبدأ التيار المكافىء.وسنقوم بعرض إحدى الطرق لعمل هذا فى القسم التالى :

٢٢ — ١٠ سرعة الأمواج الكهرمغناطيسية

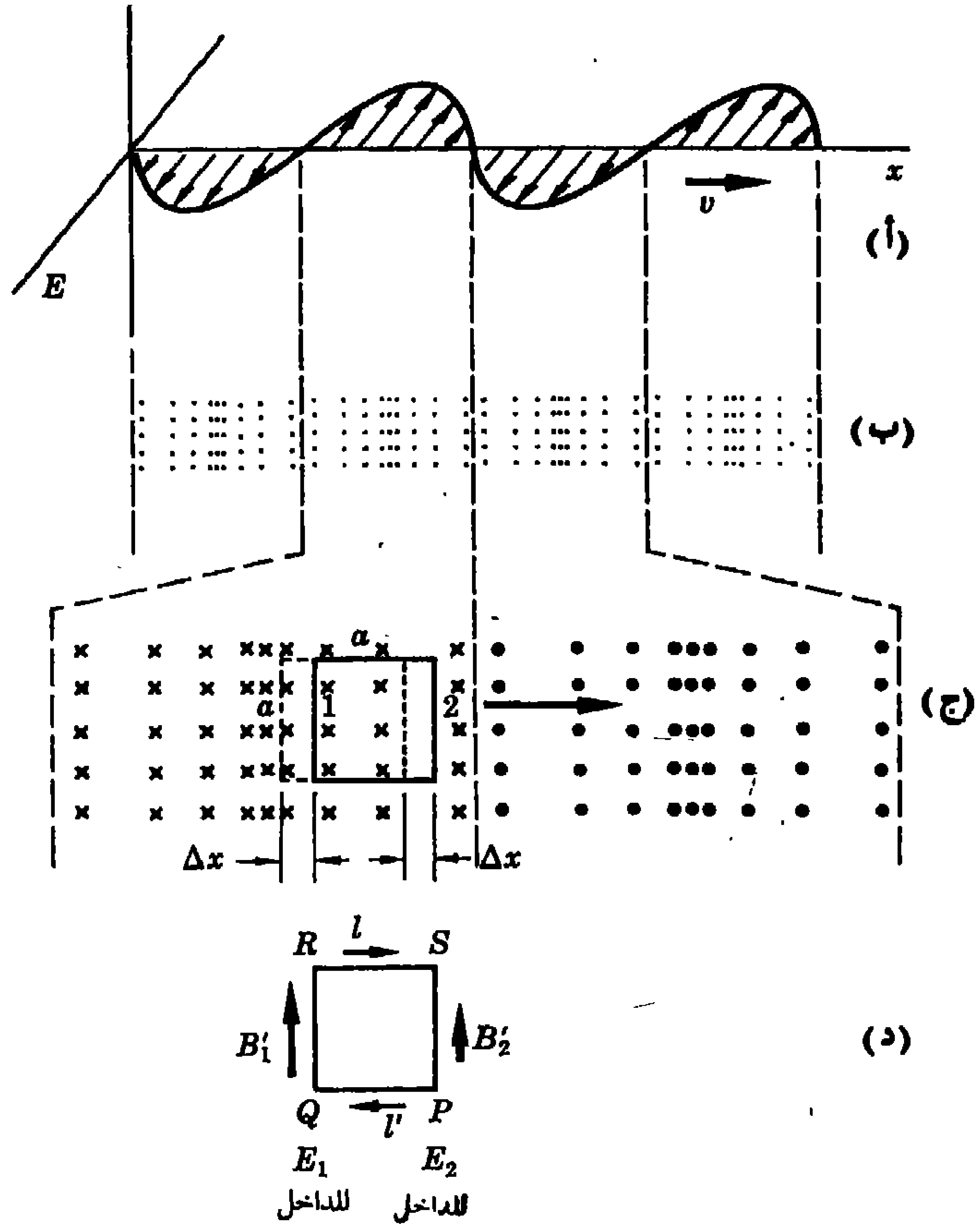
لنعتبر حركة جزء المجال الكهربائى فى موجة (ك م) خلال الفراغ وسنتبع نفس الاسلوب الذى استخدم من قبل فى القسم ٢٢ — ٩ عند تطبيق قانون الحث لفارادای على جزء المجال المغناطيسى للموجة . ولاشك أننا نذكر اننا وجدنا هناك أن المجال المغناطيسى B قد ولد مجالا كهربائيا E' وان كلا المجالين ارتبط بمعادلة هى :

$$E' = vB \qquad ٢٢ - ٧$$

حيث v هى السرعة التى تنتقل بها الموجة .

يبين الشكل ٢٢ — ٢٥أ رسما بيانيا للمجال الكهربائى عند لحظة معينة على طول محور x وقد بيناه فى مستوى افقى بدلا من الرأسى حتى تتمكن من تمثيله بصورة افضل فى اجزاء اخرى من الشكل .

ويفترض ان الموجة تنتقل الى اليمين بسرعة v ويوضح الجزء (ب) مقطعا لموجة المجال الكهربائى ثم مكبرة فى الجزء (جـ).ونريد الآن ان نعتبر التغير فى التدفق الكهربائى خلال الاطار المستطيل الموضح فى الجزء (جـ) عند انتقال الموجة عبره الى اليمين.واذا ما فسرنا



شكل ٢٢ – ٢٥
ينتقل جزء المجال الكهربائى لموجة كهرمغناطيسية الى اليمين فى (أ) ، (ب) عبر الاطار المبين فى (جـ) ونتيجة لهذا ينزاح الاطار الى اليسار على الموجة كما هو مبين .يؤدى التغير فى التدفق الكهربائى خلال الاطار الى وجود تيار مكافىء ويولد هذا التيار مجالا مغناطيسيا بجوار الاطار

هذا التغير على أنه تيار مكافىء فاننا نطبق قانون أمبير للدوائر على الاطار المعطى فى محاولة لايجاد المجال المغناطيسى .

ستنتقل الموجه التى تتحرك الى اليمين بسرعة v مسافة قدرها $v\,\Delta t$ خلال الفترة Δt وبعد هذه الفترة سينزاح الاطار الى اليسار مسافة قدرها $\Delta x = v\,\Delta t$ على الموجة كما هو مبين بالموقع المنقط فى الجزء (جـ) من الشكل . وخلال هذه العملية ، تفقد كمية مقدارها $(a\,\Delta x)E_2$ من التدفق وذلك من الناحية اليمنى للاطار وتكتسب كمية $(a\,\Delta x)E_1$ من الناحية اليسرى . ويكون التغير الخالص فى التدفق هو

$$\Delta\phi_E = (a\,\Delta x)E_1 - (a\,\Delta x)E_2 = (av\,\Delta t)(E_1 - E_2)$$

حيث استبدل بالكمية Δx المقدار $v\,\Delta t$ اما التيار المكافىء فهو ما يعطى بالمعادلة

$$I = \varepsilon_0 \frac{\Delta\phi_E}{\Delta t}$$

أو

$$I = \varepsilon_0 av(E_1 - E_2) \qquad (٢٢ - ٨)$$

سيكون هذا هو التيار المحاط بالاطار وهو التيار الذى يستخدم فى قانون أمبير للدوائر .

بالرجوع الى الجزء (د) من الشكل ٢٢ — ٢٥ فاننا سنقوم بجمع الحاصلات $(B_{\parallel}l)_n$ بادئين عند Q ومتحركين مع عقارب الساعة خلال Q ، R ، S، P ثم نعود الى Q مرة أخرى . وحيث ان E ثابت عند كل النقط الواقعة على الخط الذى يعتبر QR جزءا منه لذا فالمجال المغناطيسى المستحث على طوله يكون أيضا ثابتا ، وهو B'_1 اما المجال المغناطيسى على طول SP وهو ثابت بالمثل فسنرمز له بالرمز B'_2، ولما كان الجانب PQ والجانب RS للاطار معرضين لمجالات كهربائية متشابهة ، فان قيم B ستكون أيضا متطابقة على طول هذين الجانبين . على أنه يجب ملاحظة أنه عند جمع متجهات الاطوال — اثناء تقدمنا حول الاطار مع عقارب الساعة — فان المتجهات التى تكون الجانب RS ستكون متعاكسة مع تلك التى على الجانب PQ ولما كان B' يقع فى نفس الاتجاه لكل من الجانب الاعلى والجانب الاسفل ، لذا فهو مواز للتيار I' عند الجانب الاعلى ومتواز ومتضاد عند الجانب الاسفل فى النقطة المناظرة . وعلى هذا ، عند كتابة قانون امبير للدوائر ستكون كل كمية $(B_{\parallel}l)_n$ على الجانب الاعلى من الاطار ملغاة بكمية متساوية ومتضادة من الجانب الاسفل للاطار .

حيث ان $(B_{\parallel}l)_n$ من الجانب الاعلى للاطا تلغى تلك التى من الجانب الأسفل فان المجموع فى قانون أمبير للدوائر يؤول الى $B'_1a - B'_2a$ وبمساواة هذه الكمية بالمقدار μ_0 مضروبة فى التيار المحاط نجد ان

$$B'_1a - B'_2a = \varepsilon_0\mu_0 av(E_1 - E_2)$$

فاذا حللنا للحصول على $E_1 - E_2$ نحصل على

$$E_1 - E_2 = \frac{B'_1}{\varepsilon_0\mu_0 v} - \frac{B'_2}{\varepsilon_0\mu_0 v} \qquad (٢٢ - ٩)$$

لو أن قيم المجال الكهربائى E_1 و E_2 كانت صفرا ، أى لو لم يكن هناك مجال ، لما كان هناك تيار مكافىء ولكانت كل من B'_1 و B'_2، صفرا . علاوة على هذا ، لو كان الاطار طويلا جدا بحيث كان الجانب QR فى منطقة يوجد بها مجال كهربائى بينما SP يقع فى منطقة يكون فيها E_2 صفرا بحيث يكون كل من B'_2 و E_2 صفرا ، وعندئذ يكون لدينا — من المعادلة (٢٢ — ٩)

$$E_1 = \frac{B'_1}{\varepsilon_0\mu_0 v}$$

ولكن بما أن الجانب QR كان من الممكن اعتباره فى أى مكان ، فان هذه العلاقة تعتبر عامة لأية نقطة وليس للنقطة التى يكون فيها E هو E_1. ومن ثم نصبح فى حل من اسقاط الرموز السفلية فى المعادلة وكتابتها بشكل عام كما يلى ،

$$E = \frac{B'}{\varepsilon_0 \mu_0 v} \qquad (٢٢ - ١٠)$$

تفيد المعادلة (٢٢ — ١٠) بأن جزء المجال الكهربائى المتحرك من موجة (ك . م) يقوم بتوليد مجال مغناطيسى « فتدفق المجال الكهربائى المتدفق يكافىء تيارا ، وهذا التيار المكافىء هو الذى يولد المجال المغناطيسى . بالرجوع مرة أخرى الى الشكل ٢٢ — ٢٥ (جـ) و (د) نجد أن التدفق الكهربائى يزيد متجها لداخل الصفحة عند تحرك الموجة الى اليمين (أو عند تحرك الاطار الى اليسار) ويكافىء هذا تيارا متجها الى داخل الصفحة ، وحسب قاعدة اليد اليمنى يكون المجال المغناطيسى مؤثرا بشكل أساسى مع عقارب الساعة حول الاطار . ولما كان E_1 أكبر من E_2 فان المعادلة (٢٢ — ١٠) تفيد بأن B'_1 يجب أن يكون أكبر من B'_2 كما هو موضح فى الشكل . ويكون اتجاه كل من B'_1 و B'_2 بالضرورة الى أعلى وذلك لان B' يجب أن تؤثر مع عقارب الساعة حول لاطار . لو أننا قارننا الاتجاه النسبى بين B' و E_1 لوجدناه كما هو مبين فى الشكل ٢٢ — ٢٣ بين B ، E' (تذكر أنه عند رسم ٢٢ — ٢٥) فاننا أدرنا مستوى متجهات E عموديا على مستوى الصفحة لسهولة الرسم ، فعند عمل المقارنة يجب أن نتخيل — ذهنيا — أننا أدرنا الطرف الأسفل للاشكال 90° خارجا من الصفحة) . ومن ثم فان الشكل ٢٢ — ٢٣ يكون قابلا للتطبيق فى حالة العلاقة التى أوجدناها بين E و B' .

والمقارنة بين الحالة الراهنة وتلك التى عولجت من قبل تتضح عند الرجوع الى المعادلات التى نتجت بكل من الحالتين ، فقد وجدنا سابقا أن الجزء المغناطيسى B من موجة كهرمغناطيسية قد ولد مجالا كهربائيا E' معطى بالعلاقة ،

$$E' = vB \qquad (٢٢ - ٧)$$

ونجد الآن أن جزء المجال الكهربائى E يولد مجالا مغناطيسيا B' معطى بالعلاقة ،

$$E = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0 v} B' \qquad (٢٢ - ١٠)$$

وفى كلتا الحالتين يكون E' و B وكذا E و B' متطاوبين ويكون الاتجاه النسبى للمجالات متطابقا . وهذا يعنى بالضرورة أن B' متطابق مع B من حيث الاتجاه والطور . وبالمثل ، يتطابق كل من E ، E' فى الاتجاه والطور . ويكون السؤال الملح

الآن هو : هل E و E' هما نفسهما من حيث التطابق وهل B و B' هما أيضا نفس الشيء ؟ لقد أوضحنا فعلا تطابقهما فى الاتجاه والطور ، فلو أن المقادير أيضا كانت متطابقة فان اجابة السؤال تصبح « نعم » .

دعنا نفترض للحظة أن E و E' وكذا B و B' يمثلان نفس الشيء بقسمة المعادلة (٢٢ - ٧) على المعادلة (٢٢ - ١٠) ينتج أن

$$\frac{E}{E'} = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0 v^2}\frac{B'}{B}$$

بازالة E مع E' وكذا B مع B' نجد أن ،

$$1 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0 v^2}$$

وبحل المعادلة للحصول على v نجد ،

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}} \qquad (\text{٢٢ - ١١})$$

بوضع القيم المعينة تجريبيا للمقادير $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N\cdot s^2/C^2}$

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N)(m^2)}$

نجد أن $v = 2.998 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$.

وهى مساوية لسرعة الضوء* المقاسة .

هذه النتيجة حقا مذهلة .. لقد استخدمنا قانون الحث لفاراداى مع مبدأ ماكسويل للتيار المكافىء وذلك لايجاد سرعة أمواج (ك . م) وقد اتضح أن هذه هى سرعة الضوء المقاسة . وقد قمنا أثناء ذلك بفرض أن المجال الكهربائى المولد من تغير المجال المغناطيسى كان فعلا الجزء الكهربائى من موجة (ك م) . وبالمثل قام جزء المجال الكهربائى المتغير من موجة (ك م) بحث مجال مغناطيسى تحت مطابقته مع الجزء المغناطيسى من الموجة (ك م) . بمعنى آخر لقد افترضنا أن موجة (ك م) تولد نفسها أثناء انتقالها فى الفراغ . وقد قادنا هذا الفرض الى أن نستنتج أن الموجة تنقل بسرعة الضوء . وقد أشارت كثير من التجارب الى صحة هذا الاستنتاج وبهذا تعير اقتراحاتنا التصديق .

لقد كان ماكسويل - كما ذكرنا - هو أول من اكتشف العلاقة المتبادلة بين الضوء والكهرمغناطيسية ، وقد استنتج أن الضوء هو موجة (ك م) وهو استنتاج تم التحقق

---

* سنرى فى القسم التالى أن وحدتى الكولوم والأمبير يعرفان الآن بافتراض أن هذا صحيح تماما .

منه خلال السنوات التى تلت ذلك على نطاق واسع . على الرغم من أن أمواج اللاسلكى لم تكن قد اكتشفت حتى الوقت الذى مات فيه ماكسويل (١٨٧٩) الا أن هاينريش هيرتز (١٨٥٧ - ١٨٩٤) كان قد نجح فى توليد أمواج (ك م) غير الضوء عام ١٨٨٧ وقد ثبت فيما بعد أن هذه الأمواج تنتقل بسرعة الضوء وبذا تم تبرير تنبؤ ماكسويل بشكل كامل ونهائى .

٢٢ - ١١ تعريف الوحدات الكهربائية

لقد تعلمنا فى الأقسام السابقة الحقائق الهامة التالية :

١ - تنتقل الأمواج (ك م) عبر الفراغ بسرعة $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ والقيمة العددية لها 2.998×10^8 m/s

٢ - يكون كل من E و B متعامديـن فى موجة (ك.م) فى الفراغ . والعلاقة بينهما هى $E = cB$

وقد أصبحنا على استعداد لأن ننص بدقة على التعريفات الخاصة بالكميات التى كنا نستعملها أثناء دراستنا للكهربية وقد كان سبب التأخير هو أن سرعة الضوء المعبر عنها بدلالة ε_0 ، μ_0 هى أساس هذه التعريفات . وحيث أننا قد بينا أن السرعة c لاشعاع ك م فى الفراغ هى $\sqrt{1/\varepsilon_0\mu_0}$ فاننا نستطيع استخدام هذه الحقيقة لتعريف قيم ε_0 و μ_0

قيم μ_0 و ε_0

تعرف ، انفاذية الفراغ الحر μ_0 بطريقة اختيارية على أنها $4\pi \times 10^{-7}$ $N.^2s/C^2$ وباستخدام هذه القيمة يمكننا تعريف ε_0 بدلالة القيمة المقاسة لسرعة الضوء c. ولهذا فحيث أن ،

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N \cdot s^2/C^2}$$
$$c^2 = 1/\varepsilon_0\mu_0 = (2.998 \times 10^8\ \mathrm{m/s})^2$$

فان لدينا ،

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N)(m^2)}$$

لكى نعرف وحدة التيار ، الأمبير ، سنستعين بحقيقة أن سلكا يحمل تيارا فى مجال مغناطيسى سوف يتعرض لقوة . فاذا اعتبرنا سلكين طويلين متوازيين ومستقيمين يمر بهما نفس التيار i ، فان السلكين سيتعرضان لقوى نتيجة لوجود كل منهما فى المجال المغناطيسى للآخر . وحين تكون المسافة بين السلكين هى d فان المجال المغناطيسى عند أحدهما ، نتيجة لمرور التيار فى الآخر يكون ببساطة هو ،

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

كما وجدنا من قبل فى المعادلة (١٩ — ٦) وسيكون المجال عموديا على السلك الثانى وبهذا تكون القوة المؤثرة على طول قدره L من السلك هى :

$$F = BIL$$

أو، بعد التعويض عن B والقسمة على L،

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d}$$

الوحدات الكهربائية

بما أن القوة المؤثرة على وحدة الاطوال من السلك ، F/L يمكن قياسها وكذلك المسافة بين السلكين ، فان التيار I يمكن حسابة بدلالة الكميات المعروفة ، فحين تقاس F بوحدات نيوتن ، وحين تعطى μ_0 قيمتها $4\pi \times 10^{-7}$ Ns^2/c^2 فان التيار يكون بالوحدات التى نعرفها بأنها الأمبير . ومن ثم فالأمبير يعرف مباشرة بدلالة القوة والطول وكلاهما وحدات أساسية .

يعرف كولوم الشحنة بأنه الشحنة المحمولة خلال مقطع من سلك ما فى ثانية واحدة حين يكون التيار فى السلك أمبير واحد . ونتيجة لهذا يعتمد تعريف الكولوم مباشرة على نفس القياسات التى استخدمت لتعريف الأمبير .

لتعريف وحدة كثافة الفيض ، B ، نستخدم العلاقة ،

$$F = B_{\perp} IL$$

فاذا حمل سلك طوله 1m تيارا مقداره 1A عموديا على مجال مغناطيسى وكانت القوة المؤثرة على السلك 1N فان قيمة كثافة الفيض B تكون حسب التعريف ، 1T (أو Wb/m^2) أو 1N.s/(c) (m)

وقد تم فعلا تعريف الكميات الأخرى التى تستخدم فى الكهربية وذلك بدلالة الكميات المعرفة آنفا مع وحدات القوة ، الطول ، والزمن ، ولن نقوم بتكرراهم جميعا هنا . ولكن تجدر الاشارة أننا نجحنا فى تعريف كل الوحدات الكهربائية بدلالة تجارب محددة تضمنت قياس القوة والطول والزمن . ونتيجة لهذا سيتمكن كل شخص يحاكى وحداتنا لهذه الكميات الأساسية الثلاثة أن يحاكى أيضا وحداتنا الكهربائية .

ملخص

حين تحمى المواد الى درجة الابيضاض فان الالكترونات « تتبخر » منها فى عملية تسمى الابتعاث الثرميونى . ويكون لدى أكثر الالكترونات نشاطا ما يكفى من الطاقة الحرارية لكى تمدها بدالة الشغل ، أى الطاقة اللازمة لانتزاع الكترون من المعدن ليصبح طليقا

يقوم كل من الصمام الثنائى الثرميونى والصمام الثنائى فى الحالة الصلبة بتوصيل التيار فى اتجاه واحد فقط ونتيجة لهذا يمكن استخدامها لتحويل الجهود والتيارات المترددة الى جهود وتيارات مستمرة . تستخدم نبيطات الكترونيات الحالة الصلبة موادا شبه موصلة . تكون الالكترونات فى المواد سالبة النوع هى حاملات التيار اما فى المواد موجبة النوع فان حاملات التيار تكون الفجوات الالكترونية المسماه بالفجوات التى تعمل كحاملات موجبة الشحنة .

حين يقوم مذبذب بجعل الشحنات المنعكسة تظهر على هوائى الارسال لمحطة اذاعة فان موجة مجال كهربائى ومجال مغناطيسى ترسل من الهوائى . وهذه الموجة الكهرمغناطيسية (ك . م) تتكون من موجتين متعامدتين فيما بينهما احداهما كهربائية والاخرى مغناطيسية . والموجتان متطاورتان وتنتقلان خلال الفراغ بسرعة الضوء $c = 2.998 \times 10^{8}$ m/s

هناك أنواع كثيرة من أمواج (ك.م) . وهى تختلف فى أطوالها الموجية ، فأمواج اللاسلكى تبلغ ٨ لها مئات الأمتار . وتتدرج الأطوال الموجية فى القصر فنجد أمواج الرادار ثم تحت الحمراء (الحرارة) ، ثم الضوء المرئى ، ثم الضوء فوق البنفسجى فأشعة اكس فأشعة جاما . وتغطى هذه الأمواج مدى أطوال الامواج يصل الى مادون 10^{-10} m . فى جميع امواج ك م يكون $E = cB$ فى الفراغ .

تعرف الوحدات الكهربائية بدلالة سرعة الضوء ، فحسب التعريف $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N · s^2/C^2 وحيث أن سرعة الضوء تعطى بالمعادلة $1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ فان هذه المعادلة تستعمل لتعريف ε_0. ويمكن بعد ذلك تعريف باقى الوحدات الكهربائية بدلالة وحدات الكتلة والطول والزمن .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الاتى :

١ – أن تعطى شرحا كيفيا عن سبب اعتماد الابتعاث الثرميونى على درجة الحرارة .

٢ – أن تشرح كيف يعمل صمام ثنائى مفرغ وأن تصف استخدامه كمقوم .

٣ – أن تصف كيف يمكن صناعة موصل سالب النوع من السيليكون . وأن تكرر هذا بالنسبة لشبة موصل موجب النوع .

٤ – أن تشرح بطريقة كيفية سبب وجود التقويم لدى وصلة من النوع الموجب مع السالب (p-n) وأن تعطى رمز ثنائى الحالة الصلبة وأن تبين أى الاتجاهين يسمح بمرور التيار .

٥ – أن ترسم دائرة مقوم نصف – موجى وأن تشرح كيف يتم تنعيم خرجه . أن ترسم دائرة مقوم الموجة – الكاملة وأن تشرح مبدأ عملها .

٦ – أن تخطط المجالين E و B لموجة ك م . وأن تحسب الطول الموجى لموجه لاسلكى حين يكون تردد محطة الاذاعة معروفا .

٧ – أن تضع قائمة بالأنواع المختلفة من أمواج (ك م) حسب تناقص أطوالها الموجية.أن تذكر نوع الأمواج التى ينتمى اليها طول موجى معين .

٨ – أن تصف الطريقتين اللتين يتم بهما كشف أمواج اللاسلكى بواسطة جهاز الراديو ، أن تشرح وظيفة دائرة LC فى جهاز الراديو . وأن تشرح كيف يمكن انتقاء محطة اذاعة معينة بواسطة جهاز الراديو .

٩ – أن تعطى سرعة أمواج ك م فى الفراغ

مصطلحات وعبارت هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

الابتعاث الثرميونى

صمام ثنائى مفرغ

اشباه الموصلات من النوع الموجب والنوع السالب .

صمام ثنائى الحالة الصلبة

مقوم نصف – موجى ومقوم الموجة الكاملة .

موجة ك م

طيف موجة ك م

سرعة أمواج ك م هى c

أسئلة وتخمينات

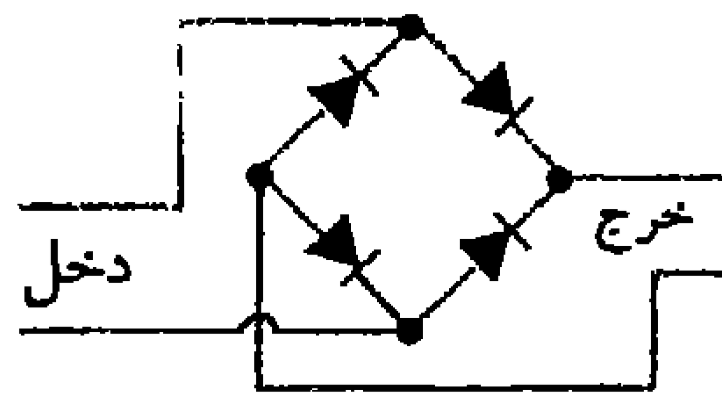
١ – اذا تساوت كل الأشياء الاخرى ، فما هو نوع المادة المفضل لصنع فتيلة صمام مفرغ،أهى ذات دالة الشغل الكبيرة أم ذات دالة الشغل الصغيرة ؟

٢ – الدائرة الموضحة فى الشكل ٢٢م – ١ هى لمقوم موجة كاملة (يشار اليه عادة على أنه مقوم قنطرى) . افحصه ثم اشرح لماذا كان التيار مقوما ويمر خلال نصفى الموجة .

٣ – يكون هوائى الارسال لبعض محطات الاذاعة رأسيا وللبعض الآخر أفقيا . صف ثم قارن أمواج ك م المولدة من هذين النوعين من الهوائيات . كيف – على وجه الخصوص – تكون وجهة B و E بالنسبة لسطح الأرض .

٤ – بالرجوع الى السؤال السابق . اذا فتحت جهاز راديو ترانزستور فانك ترى كيف يكون تركيب ملف الهوائى به . كيف يمكنك باستعمال الراديو أن تحدد ما اذا كان هوائى الارسال بالمحطة البعيدة أفقيا أم رأسيا ؟

٥ – تمر الأمواج الكهرمغناطيسية القادمة من معظم محطات الاذاعة فى العالم خلال المنطقة المحيطة بك . كيف يقوم جهاز الراديو أو التليفزيون بالتقاط محطة معينة تود السماع اليها ؟ عندما تدير قرص الراديو فما الذى يحدث بالداخل لالتقاط المحطات المختلفة ؟



شكل ٢٢م – ١

٦ – هناك نوعان من هوائيات الاستقبال فى أجهزة الراديو والتليفزيون ، يلتقط أحدهما الجزء الكهربائى من موجة ك م ويلتقط الآخر المغناطيسى . أفحص جهاز راديو ترانزستور للجيب أو جهاز راديو للمنضدة وانظر أى النوعين يستخدم هل من الممكن استخدام النوعين معا ؟

٧ – نرى من وقت لآخر فى السينما او على شاشة التليفزيون بعض الأبطال وهم يحاولون تحديد موقع محطة ارسال سرية وذلك بقيادة سيارة بالقرب منها وبداخل السيارة جهاز متصل به ملف يدور ببطء عند سقف السيارة . اشرح عمل هذا الجهاز .

٨ – يدعى البعض أنه بالقرب من هوائى ارسال لاسلكى قوى يمكن أحيانا رؤية شرارات تقفز على طول سلك بسور مزرعة ما . مارأيك فى هذا الادعاء ؟

٩ – يتعرض الطعام والأوانى فى مواقد الامواج الدقيقة لامواج رادار (ك م) عالية التردد جدا . اذا تركت معلقه بداخل مثل تلك المواقد فانها تسخن بدرجة عالية . ما الذى يجعلها تسخن ؟ هل يمكنك شرح عملية التسخين بدلالة الجزء الكهربائى من الموجة ؟ ام بدلالة المغناطيسى ؟ كيف تسخن المواد غير المعدنية داخل الموقد ؟ هل يمكن لطبق زجاجى أن يسخن فى مثل ذلك الموقد ؟

١٠ – هناك بعض الشك حول سلامة الانسان اذا تعرض لامواج لاسلكى أو أمواج دقيقة عالية الشدة . لماذا يتوقع أن تعتمد درجة الخطر على تردد الأمواج ؟ ما الذى تتوقعه بأن يكون أشد خطرا (اذا كان هناك خطر) اللاسلكى أم الأمواج الدقيقة ؟

مسائل

١ – تصل درجة حرارة فتيلة محماه لدرجة الابيضاض داخل مصباح اضاءة أو صمام مفرغ الى حوالى 2500 k (أ) ما هى طاقة الحركة المتوسطة لالكترون بالفتيلة ؟ (ب) قارن هذا بدالة الشغل فى التنجستن وهى حوالى 4.5 eV

٢ – باعتبار أن الكترونات التكافؤ فى معدن ما على أنها طليقة ما هو متوسط سرعة الكترون فى قطعة من المعدن محماه لدرجة الابيضاض عند درجة حرارة 2500 k ؟

٣ –** باعتبار انه يوجد الكترون واحد حر لكل ذرة (أ) أوجد ضغط الغاز الالكترونى داخل كتلة من النحاس عند درجة حرارة 300 k (ب) قارن هذا بالضغط العيارى للهواء . (كثافة النحاس $8.92 g/cm^3$ والكتلة الذرية= 63.5)

٤ – يتصل نظام مقوم موجه – كاملة بمقاوم 50,000 Ω على هيئة حمل له ويقوم بتقويم جهد متردد 60 Hz (أ) ما هى قيمة مكثف الترشيح الواجب استعماله (كما فى شكل ٢٢ – ١٠) اذا كان ثابت الزمن لنظام المرشح – الحمل يبلغ عشرة أضعاف زمن المقوم « بدون تيار » ؟ (ب) لماذا كان من الصعب الحصول على جهد مستمر من نظام تقويم 60 Hz اذا ما أريد سحب تيارات كبيرة منه ؟

٥ – لو أن جهد الخرج فى الشكل ٢٢ – ١٠ كانت قيمتة العظمى 12.0V وقيمته الدنيا 9.6V فما قيمة التموج لنظام المقوم ؟

٦ – تعمل محطة اذاعة WJR فى ديترويت عند تردد قدره 760 kc/s (أ) ما هو الطول الموجى للموجة التى ترسلها ؟ (ب) كم من الوقت تستغرقه قمة الموجة المرسلة من المحطة لكى تصل الى القمر الذى يبعد مسافة قدرها 3.84×10^8 m

٧ – عندما يدق قلبك فان فروقا ضئيلة فى الجهد تتكون بين الأجزاء المختلفة من جسدك (وهذه تقاس بواسطة جهاز رسم القلب واختبارات طبية مماثلة) . افترض أن قلبك يدق خمسة وسبعين مرة فى الدقيقة (أ) ما هو تردد موجة ك م التى يرسلها جسدك نتيجة للجهد والشحنة المتذبذبة بشكل متتالى على جسدك ؟ (ب) ما هو الطول الموجى لموجة(ك م) الخافتة جدا والتى يرسلها جسدك ؟

٨ – ان احدى الطرق التى يمكن بها امداد العضلات وأجزاء الجسم الاخرى بالحرارة هى العلاج بالانفاذ الحرارى وفيها يتم ارسال أمواج الرادار الى داخل الجسم مثلما يقوم موقد الأمواج الدقيقة بارسال أمواجه داخل المواد لتسخينها ، فيقوم المجال الكهربى المتذبذب للموجة بجعل الجزيئات ثنائية الاستقطاب والايونات تتحرك جيئة وذهابا مولدة بهذا حرارة من النوع الاحتكاكى ، كما أن المجال المغناطيسى المتذبذب يستحث ق.د.ك تسبب بدورها تسخين جول . وتبلغ قيمة الترددات العيارية فى هذه الطريقة 900 2560MHz (أ) ما هى الأطوال الموجية لاشعاع ك.م فى الهواء والتى ينتج من تلك الترددات ، (ب) هل ترى أية مشكلة فى استخدام العلاج بالانفاذ الحرارى على وجه شخص تكون احدى أسنانه محشوة بمعدن ما ؟

٩ – وقع انفجار على بعد 50 km من شخص ما . ما هى الفترة التى تمر على الشخص ما بين رؤية الانفجار وسماع الصوت ؟ (اعتبر سرعة الصوت 340 m/s)

١٠ – يتجه سلك طوله 10 m فى اتجاه مجال كهربائى لموجة كهرمغناطيسية (أ) اذا كانت القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفى السلك هى 10^{-4}V فما هى القيمة العظمى للمجال الكهربائى لموجة ؟ (ب) ما هى القيمة العظمى للمجال المغناطيسى لنفس الموجة ؟ (ستكون هذه الاشارة ضعيفة الى حد ما) .

١١ –* تبلغ أبعاد هوائى اطارى على هيئة مستطيل 10 cm. × 30cm وبه 200 لفة من السلك حوله . ما مقدار . ق. د. ك المتولدة بين طرفى الاطار بسبب موجة كهرمغناطيسية ترددها 10^6cps ويبلغ الحد الاقصى لمجالها الكهربائى 10^{-5} V/m

١٢ –* يقوم لوحان مستديران مساحة كل منهما A وأحدهما موضوع فوق الآخر بدور مكثف متوازى اللوحين . فاذا كانت المسافة بين اللوحين هى d ، فاثبت أن B بين اللوحين تعطى بالعلاقة $\mu_0 Ir/2A$ حين يمر تيار مقداره I فى المكثف ، المسافة r هى المسافة الشعاعية .

(النصف قطرية) مقاسة من خط مراكز اللوحين الى النقطة المرادة .. تلميح : طبق قانون أمبير للدوائر على دائرة نصف قطرها r خلال النقطة التى يراد ايجاد قيمة B عندها . ثم استخدم التيار المكافىء خلالها .

١٣ – يدور الالكترون السالب حول النواة الموجبة بتردد يبلغ 3.6×10^{15} Hz فى صورة ذرة الايدروجين لبوهر . لو أن هذا النظام يخضع للقوانين التى درست فى هذا الفصل فانه سيعمل كهوائى يشع أمواجا لها هذا التردد . (أ) أوجد الطول الموجى لهذه الأمواج و (ب) اذكر فى أى جزء من طيف ك . م . ستقع هذه الأمواج .

الفصل الثالث والعشرون

خواص الضـــوء

سنهتم أساسا فى هذا الفصل والفصول القليلة التالية بجزء ضئيل جدا من الطيف الكهرمغناطيسى الكلى . يتكون هذا الجزء من مدى صغير من الاطوال الموجيه التى تدركها العين وتعرف هذه الأطوال الموجية **بالضوء** . على أنه بالرغم من اهتمامنا الأساسى بالضوء إلا أننا سنتعلم الكثير مما يمكن تطبيقه على كل الاشعاع الكهرمغناطيسى .

٢٣ - ١ مفهوم الضوء

منذ قديم الازمنة كانت خواص الضوء مثارا للدهشة والاثارة نحو اجراء تجارب . كما كانت طبيعة الضوء دائما موضوعا لتأملات عظيمة . ففى عصر نيوتن كان كل علماء تلك الفترة تقريبا يقومون بأبحاث علمية فى طبيعة الضوء ، وبنى نيوتن نفسه كثيرا من شهرته من تجارب الضوء التى أجراها .

وعلى الرغم من عظيم اهتمامه بالضوء ، الا أن الطبيعة الداخلية للضوء ظلت محل جدل حتى مطلع القرن الحالى . وخلال عصر نيوتن ولسنوات خلت بعد ذلك كان هناك خلاف حول ما اذا كان شعاع الضوء هو تيار من الجسيمات أو هو أمواج من نوع معين . وقد كان نيوتن نفسه من أعظم مؤيدى النظرية الجسيمية ونظرا لمكانتة فان الكثيرين كانوا يميلون لرأية . فى عام ١٦٧٠ استطاع كريستيان هيجنز وهو أحد معاصرى نيوتن أن يفسر كثيرا من خواص الضوء باعتباره موجيا فى طبيعته . وقد كان لكلتا هاتين الفكرتين حول طبيعة الضوء مؤيديها .

ولقد ظل الأمر كذلك حتى عام ١٨٠٣ حين قدم توماس يونج (وبعدها بقليل أوجستين فرنل) برهانا يوضح ان الأشعة الضوئية تستطيع التداخل مع بعضها البعض مثل الأمواج الصوتية وبهذا أصبحت النظرية الموجية مقبولة عالميا . وفى ذلك الوقت تقريبا أمكن قياس سرعة الضوء فى الماء وقد كانت هذه النتيجة مناقضة للنظرية الجسيمية ومعضدة للنظرية الموجية . ومن ثم بحلول عام ١٨٦٥ حين أثبت ماكسويل نظريا أن الأمواج الكهر مغناطيسية يجب أن تنتقل بسرعة الضوء ، أمكن بارتياح كبير تقبل فكرة أن للضوء أمواجا .

قد يظن الآن أنه بقدوم عام ١٩٠٠ أصبحت طبيعة الضوء مفهومة بشكل كبير ولكن حتى ذلك الوقت لم يكن متاحا الكثير عن انبعاث الضوء من الذرات . وظل الأمر كذلك حتى عام ١٩١٣ حين أعطى بوهر أول تفسير منطقى صحيح لميكانيكية ابتعاث الضوء ، وقد عدلت مفاهيم بوهر كثيرا حتى أن أبتعاث الضوء لم يفهم بشكل نهائى الا حوالى عام ١٩٣٠ . علاوة على ذلك ، أشار أينشتين عام ١٩٠٥ أنه توجد خاصية واحدة على الأقل للضوء وهى التأثير الكهرضوئى – التى سنناقشها فى الفصل السادس والعشرين – قد أحسن تفسيرها باعتبار الضوء مكونا من جسيمات أو كمات . وقد تم التوسع فى هذا المفهوم خلال السنوات التالية حتى أصبحنا اليوم نعتبر الضوء ذا شخصية مزدوجة فهو جزئيا يبدو كأمواج وجزئيا كجسيمات . وسنتطرق بالمزيد من الحديث عن هذه الأشياء وتطورات أخرى فى الفصول التالية .

من الواضح أن موضوع الضوء ذو تاريخ علمى متنوع وطويل ونتوقع أنه فى السنين القادمة سيستمر فهمنا للضوء وطبيعته فى النمو والاطراد . وسيكفينا مع هذا

خلال الفصول القليلة القادمة أن نركز على مظاهر الضوء التى تتضح من طبيعته الكهرمغناطيسية . أما المميزات الأخرى للضوء والتى تتضمن طبيعته الجسيمية وأصله الذرى فانها ستناقش فى الأقسام المتأخرة من هذا الكتاب .

الاطوال الموجية للضوء

تقاس الأطوال الموجية لأمواج الضوء المرئية بطرق ستناقش فى الفصل الخامس والعشرين . وقد وجد أن هذه الأطوال الموجية تقع فى المدى 4×10^{-5} cm إلى 7×10^{-5} cm ويوضح الشكل ٢٣ – ١ موقع الألوان المختلفة على تدريج الأطوال الموجية وكذلك على لوحة الألوان الملحقة .

لاحظ ايضا أن هناك ثلاث وحدات لقياس الطول قد استخدمت فى شكل ٢٣ – ١ .

	بنفسجى	أزرق	أخضر	أصفر	أحمر

سنتمترات	4×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}	7×10^{-5}
انجستروم	4000	5000	6000	7000
نانومتر	400	500	600	700

شكل ٢٣ – ١
يعتبر التناظر بين الأطوال الموجية واللون الموضح هنا تقريبا فقط فالألوان مثل الأخضر المزرق والبرتقالى تحتل المناطق المتوسطة (انظر اللوحة الملونة)

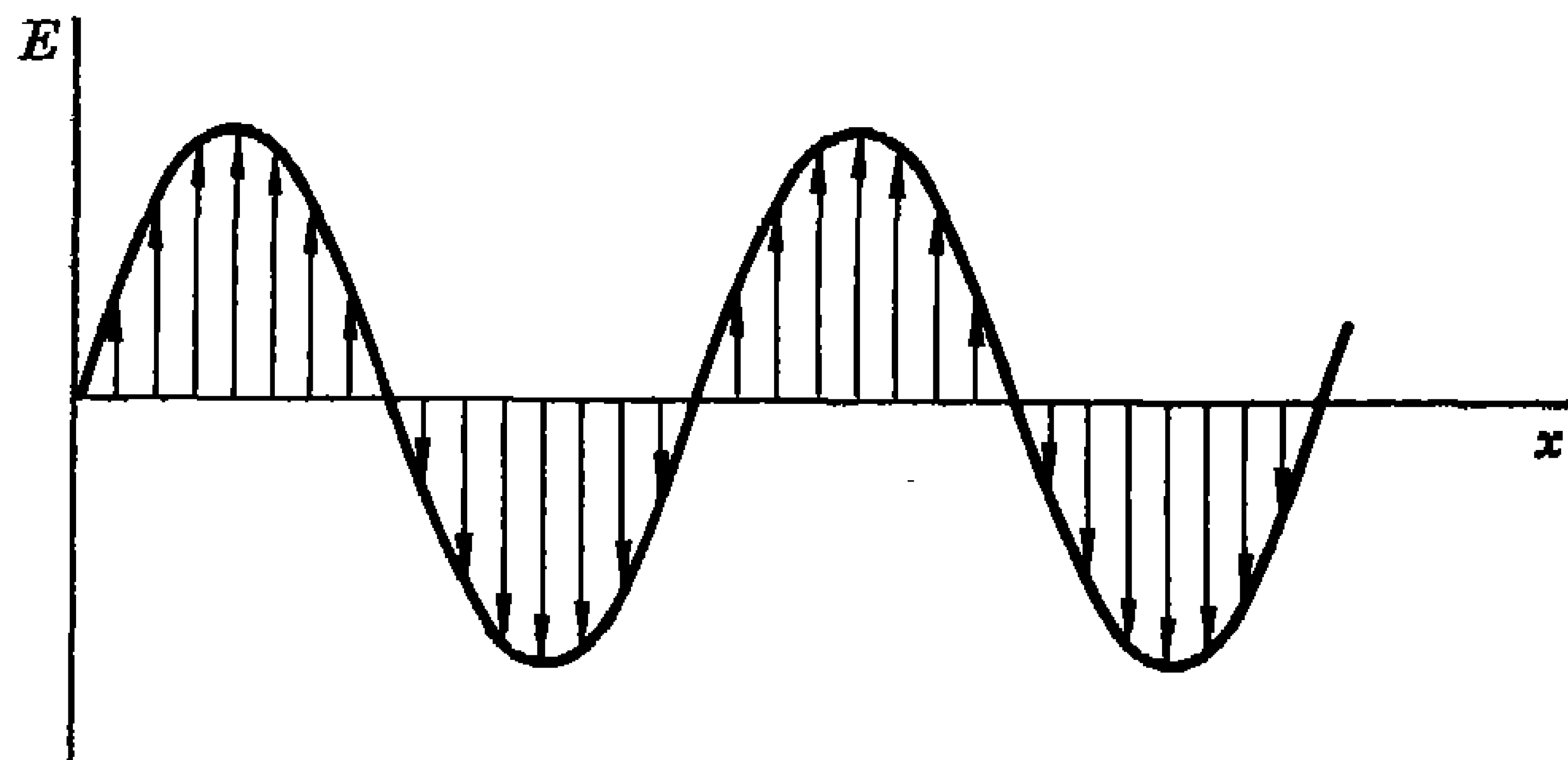
تقاس الأطوال الموجية بشكل عام بالوحدات التالية :

انجستروم $1\ \text{Å} = 10^{-8}\ \text{cm} = 10^{-10}\ \text{m}$

ميكرومتر $1\ \mu\text{m} = 10^{-4}\ \text{cm} = 10^{-6}\ \text{m}$

نانومتر $1\ \text{nm} = 10^{-7}\ \text{cm} = 10^{-9}\ \text{m}$

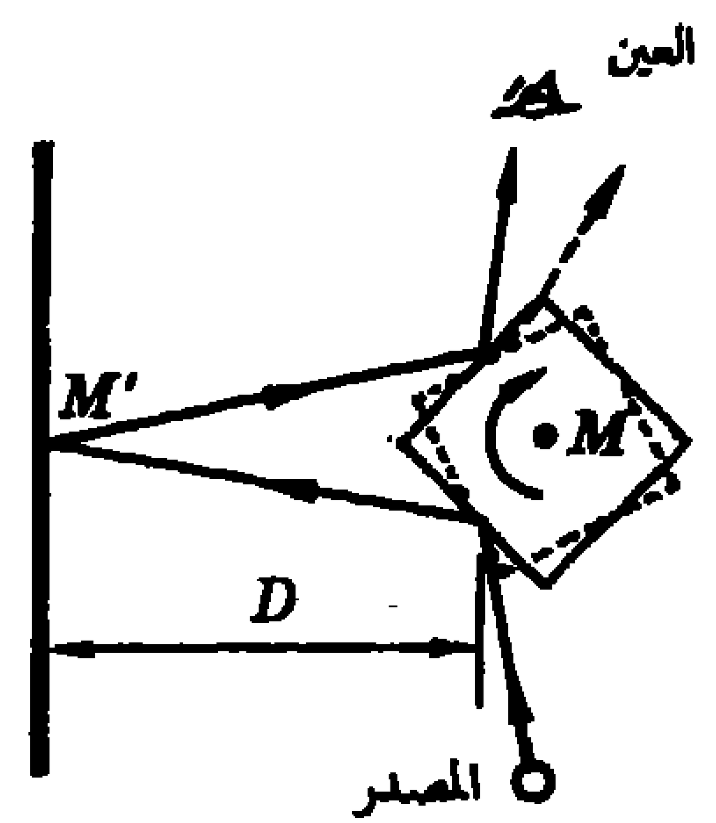
الأمواج الضوئية ذات طبيعية كهرمغناطيسية وتتكون من مجال متعامد ومتطاور مع مجال مغناطيسى ، كما نوقش فى الفصل السابق . ويوضح الشكل ٢٣ – ٢ المجال الكهربى لموجة تنتشر فى اتجاه واحد فى الفراغ ومن المفروض أن الموجة تنتقل على طول محور x الى اليمين . لاحظ أن المجال الكهربى المتذبذب متعامد مع محور x وعلى ذلك تكون أمواج الضوء مستعرضة ، وذلك لأن حركة التذبذب



شكل ٢٣ – ٢
يتذبذب المجال الكهربى لموجة كهرمغناطيسية عموديا على اتجاه الانتشار وعليه تكون الموجة مستعرضة .

عمودية على اتجاه الانتشار وكونها كذلك يجعلها تشترك فى كثير من الخواص مع أمواج الأوتار المشدودة المتذبذبة وكذلك على أمواج سطح الماء اذ أن هذه أيضا أمواج مستعرضة .

٢٣ - ٢ سرعة الضوء



شكل ٢٣ - ٣
اذا دارت المرآة بالسرعة الصحيحة بالضبط فان الشعاع ينعكس الى عين المشاهد . تكون المسافة D فى الواقع أكبر بكثير جدا عما هو مبين

هناك عدة طرق لتعيين سرعة الضوء وسنذكر هنا احدى هذه الطرق العامة وهى الطريقة التى استعملت على نطاق واسع فى الاعمال ذات الدقة العالية . وقد استخدم هذه الطريقة مايكلسون فى بداية الثلاثينات من هذا القرن لقياس سرعة الضوء بين قمتى جبلين فى كاليفورنيا . وقد استخدمت نفس الطريقة العامة من قبل ولكن لمسافات أصغر لقياس سرعة الضوء داخل المواد بدلا من الهواء .

يستخدم فى هذه الطريقة الجهاز الموضح بصورة مبسطة فى الشكل ٢٣ - ٣ ينعكس شعاع ضوئى من المصدر من أحد جوانب المكعب M الذى يعتبر أربعة جوانب منه مرايا ، ثم ينعكس الشعاع من المرآة M' عائدا الى المكعب ، حيث ينعكس مرة أخرى كما هو مبين . فاذا كان المكعب فى المكان الصحيح بالضبط فان الشعاع سيدخل عين المشاهد فى الوضع الموضح . (فى الحقيقة ينظر المشاهد خلال تلسكوب موضوع عند مكان العين فى الرسم ، فيرى صورة للمصدر) .

جدول ٢٣ - ١
معاملات الانكسار

المادة	$c/v = n$	المادة	$c/v = n$
الهواء*	1.0003	زجاج تاجى	1.52
الماء	1.33	كلوريد الصوديوم	1.53
ايثانول	1.36	بوليستيرين	1.59
أسيتون	1.36	ثانى كبريتيد الكربون	1.63
كوارتز منصهر	1.46	زجاج ظرانى	1.66
بنزين	1.50	ايوديد الميثلين	1.74
لوسيت اوبلكسيجلاس	1.51	ماس	2.42

* عند الضغط ودرجة الحرارة المعياريين

افترض ، مع هذا أن المكعب يدور حول محور يخترق مركزه عموديا على الصفحة حين يكون فى الوضع المبين بالخطوط السميكة فى شكل ٢٣ - ٣ فان الشعاع ينعكس الى المرآة M' كما هو مبين . ومع الوقت يعود الشعاع الى المكعب من المرآة M' ويكون المكعب قد أخذ الوضع المبين بالخط المتقطع وبهذا لا ينعكس الشعاع نحو عين المشاهد. يجب أن يدور المكعب ربع دورة خلال الوقت اللازم للشعاع كى ينتقل الى M' ثم يعود حتى يمكن أن ينعكس بالطريقة الصحيحة ، وعندئذ فقط سيعكس المكعب الشعاع نحو عين المشاهد .

وتتلخص تقنية التجربة فى الاسراع بحركة المكعب حتى ينعكس الشعاع بالطريقة المطلوبة . وعند تلك السرعة فاننا نعلم أن الزمن اللازم لربع دورة من دورات المكعب يساوى الزمن الذى يستغرقة الضوء فى قطع مسافة مقدارها $2D$ وكل ما نحتاج معرفته هو سرعة* دوران المكعب وكذا المسافة D لكى نحسب سرعة الضوء . وقيمة سرعة الضوء المتخذة حاليا فى الفراغ هى

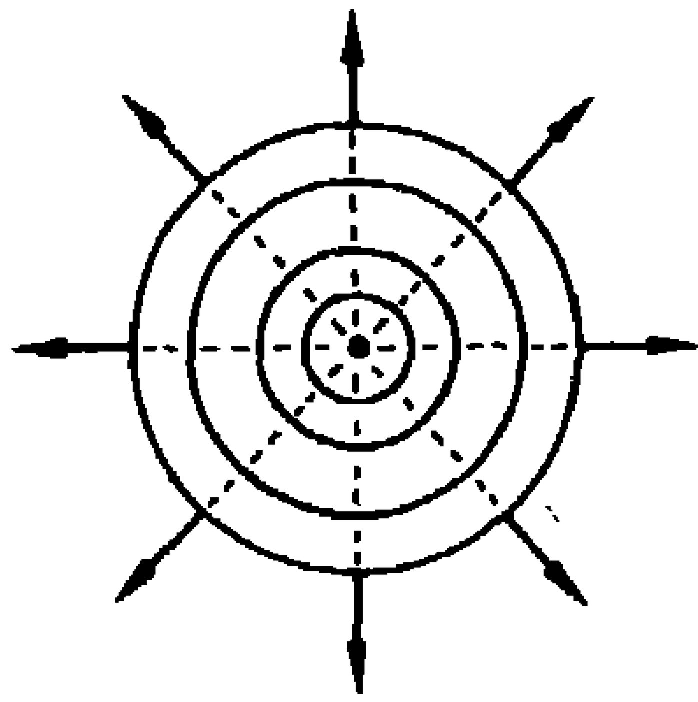
سرعة الضوء

$$c = 2.997925 \times 10^8 \pm 0.000010 \times 10^8 \text{ m/s}$$

وتبلغ سرعة الضوء فى الهواء مقدارا يقل بنحو 0.03 فى المائة فقط عن هذه القيمة .

ينتقل الضوء أسرع فى الفراغ ، وتكون سرعته فى المواد الأخرى أقل دائما من c . علاوة على ذلك فان السرعة خلال المواد تعتمد على الطول الموجى للضوء . وكذلك على تركيب تلك المواد وقد وضعنا قائمة بالنسبة بين سرعة الضوء فى الفراغ الى سرعته فى المواد المختلفة فى الجدول ٢٣ — ١ وكان الطول الموجى المستخدم لهذا الجدول هو $\lambda = 5890$ Å. وهو الطول الموجى للضوء الأصفر الذى يبعث به مصباح بخار الصوديوم .

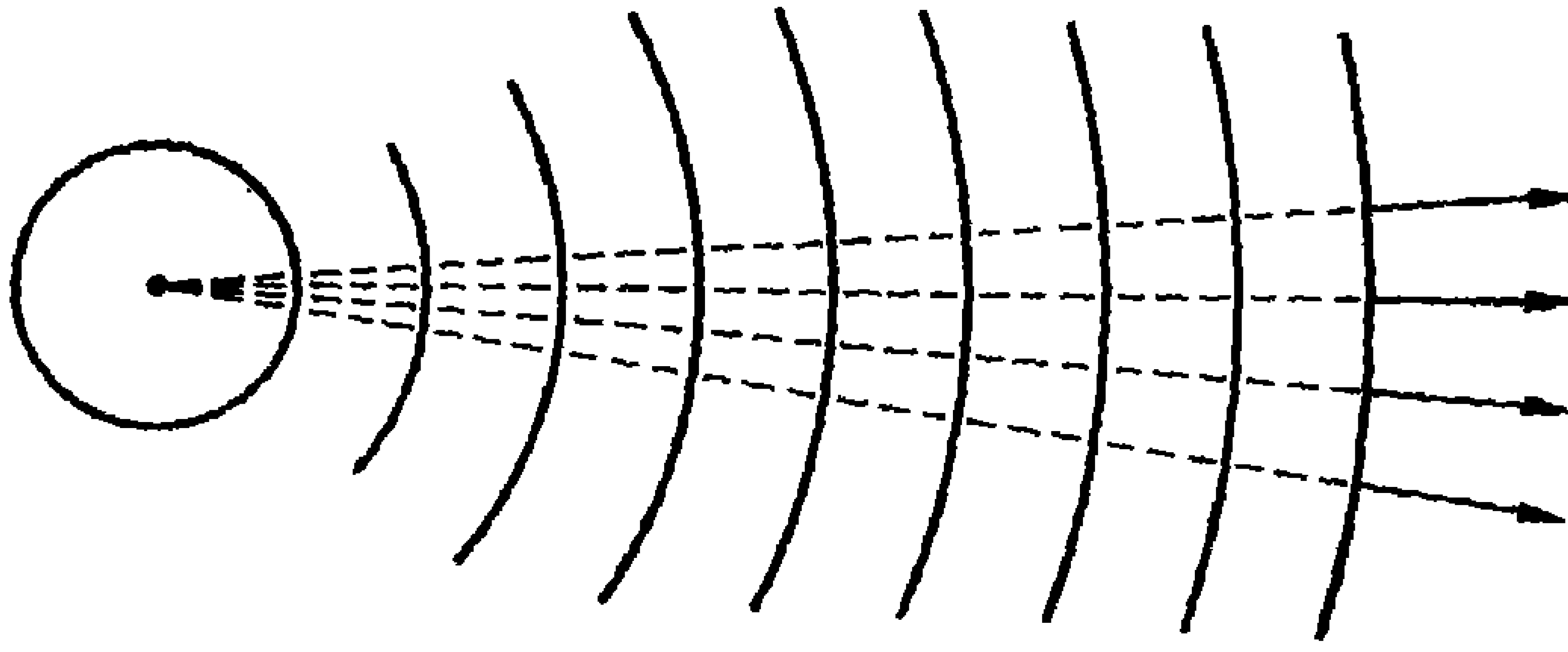
٢٣ — ٣ انعكاس الضوء



شكل ٢٣ — ٤
تكون الأشعة متعامدة مع صدور الموجة وتشير الى اتجاه حركة الموجة

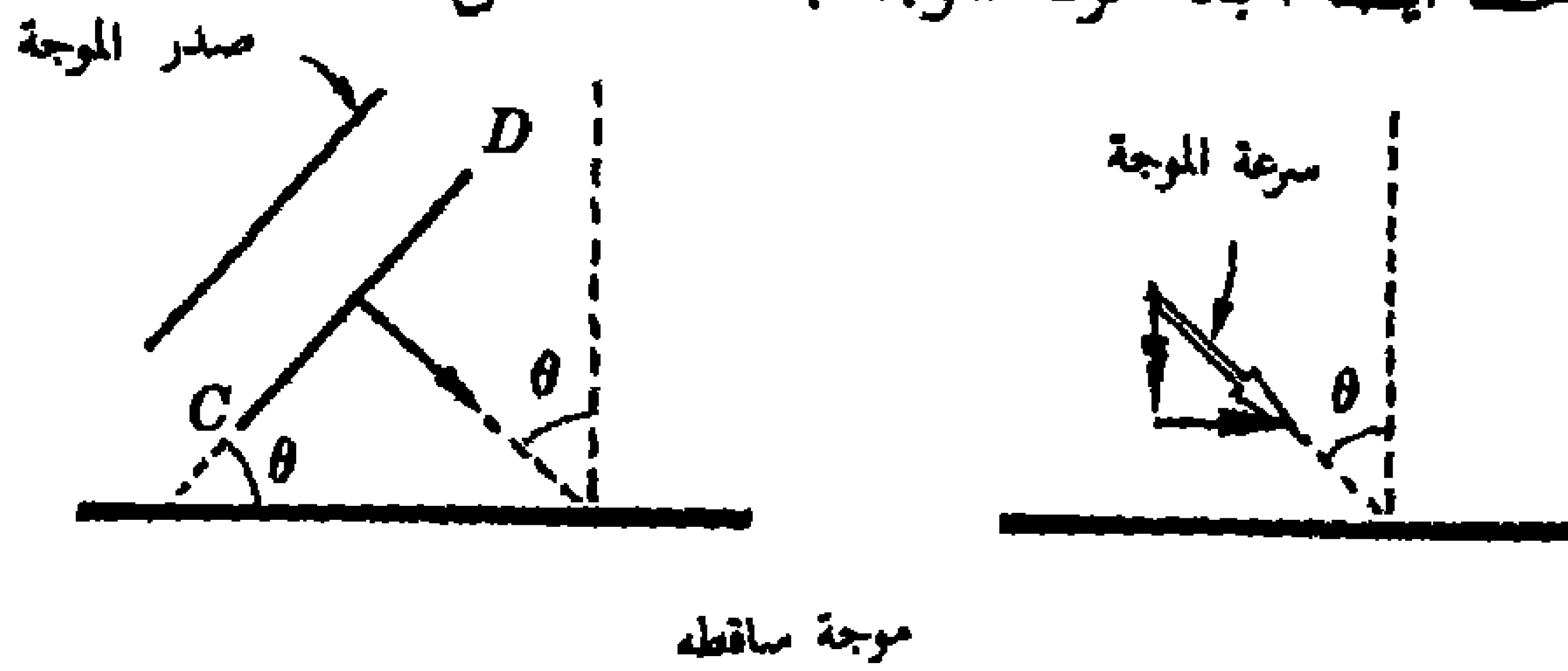
حين يلقى حجر فى بركة كبيرة ساكنة من الماء فان مجموعة من الأمواج المستديرة تنتقل خارجة من النقطة التى اصطدم الحجر فيها بالماء . وكلنا على علم بهذا الموقف ولكن دعنا نتمعن فيه بشىء من التفصيل . يوضح الشكل ٢٣ — ٤ هذه الأمواج الدائرية أو **صدور الموجة** ، وهى تنتقل الى الخارج من المركز فى الاتجاهات المبينة بالأسهم وتسمى هذه السهام المنطلقة فى اتجاه صدر الموجة **أشعة** . **لاحظ أن الأشعة تكون دائما متعامدة مع صدور الموجة** . ومن ثم يمكننا تحديد حركة الموجة اما باستعمال الأشعة أو برسم الموجة نفسها ولكل طريقة قيمتها .

اذا اعتبرنا الحالة التى نكون فيها على مسافة كبيرة من مصدر الموجة فان صدور الموجة تصبح تقريبا خطوطا مستقيمة (أو مستويات مسطحة اذا كنا نتناول الأبعاد الثلاثة) . كما هو مبين فى شكل ٢٣ — ٥ . يستدل من هذا الشكل أنه على مسافات بعيدة عن المصدر تكون الأمواج عبارة عن أمواج مستوية وتكون الأشعة متوازية . من المناسب دائما استعمال الأمواج المستوية فى الحسابات وحين يكون المصدر بعيدا بدرجة كافية أو حين تستعمل عدسة مناسبة فان الأمواج تكون غالبا من هذا النوع .

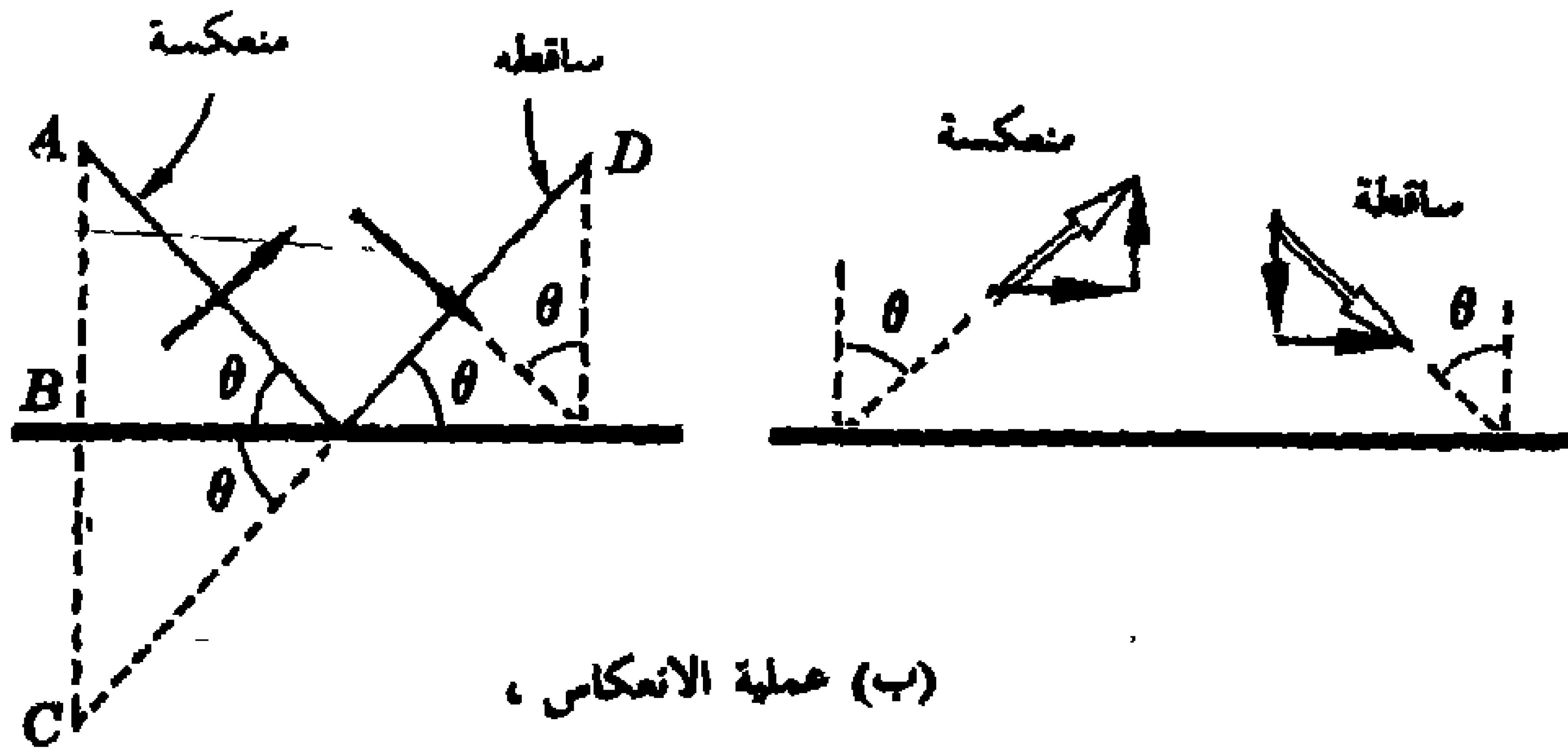


شكل ٢٣ – ٥
عندما تنتشر الموجه الكرية بعيدًا عن المصدر فانها تصبح أكثر شبها بموجة مستوية وتصبح الأشعة أقرب ما تكون متوازية

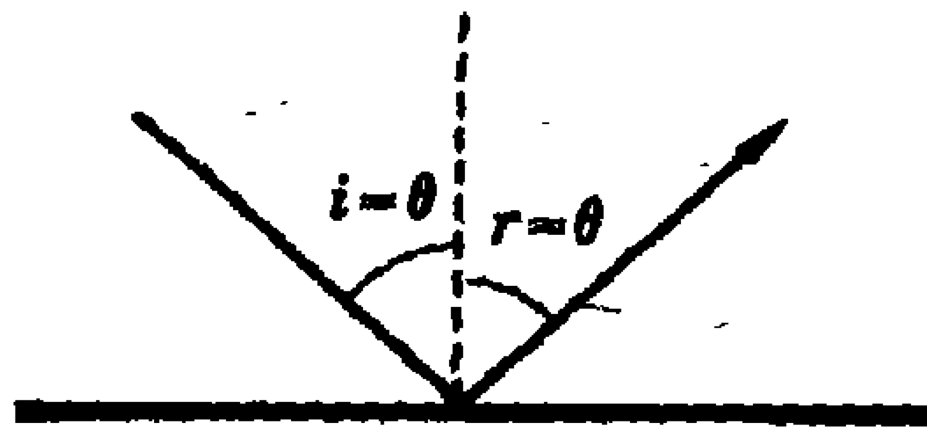
افترض أن سلسلة من أمواج الماء المستوية تسقط على حائط مسطح كما هو مبين فى الشكل ٢٣ – ٦ أ . يمكن تصور سرعة الأمواج على أنها مكونة من مركبتين ، احداهما عمودية على الحائط والأخرى موازية للحائط . تنعكس المركبة العمودية عند اصطدامها بالحائط وبهذا تنعكس الموجة الى أعلى كما يبين الشكل ٢٣ – اب . ولو أن صدر الموجة الساقطة CD كان قد استمر فى اتجاهه الأصلى لكان قد وصل الى الوضع CD فى الشكل ٢٣ – اب ، ولكنة بدلا من هذا ينعكس الى أعلى وتصبح النقطة الأصلية C على صدر الموجة هى فى الواقع عند النقطة A فوق السطح بحيث $\overline{AB} = \overline{BC}$ لاحظ ايضا أتجاه حركة الموجة بعد الانعكاس .



موجة ساقطه



(ب) عملية الانعكاس ،



(جـ) رسم بيانى للأشعة

شكل ٢٣ – ٦
تنعكس الموجة الساقطة بحيث تساوى زاوية السقوط i زاوية الانعكاس

تفيدنا الحقيقة القائلة بأن $\overline{BC} = \overline{AB}$ فى الشكل ٢٣ - ٦ب على الفور بأن الزوايا الأربعة كلها المشار اليها بالرمز θ فى الشكل متساوية . (لماذا ؟) . علاوة على ذلك ، حيث أن الأشعة متعامدة مع صدور الموجة فان الزاوية التى يصنعها الشعاع مع العمود القائم على السطح تكون هى ايضا θ كما هو يوضح ذلك الجزء (جـ) من الشكل . (لماذا ؟) . ويقودنا هذا الى استنتاج أن زاوية السقوط i تساوى زاوية الانعكاس r .

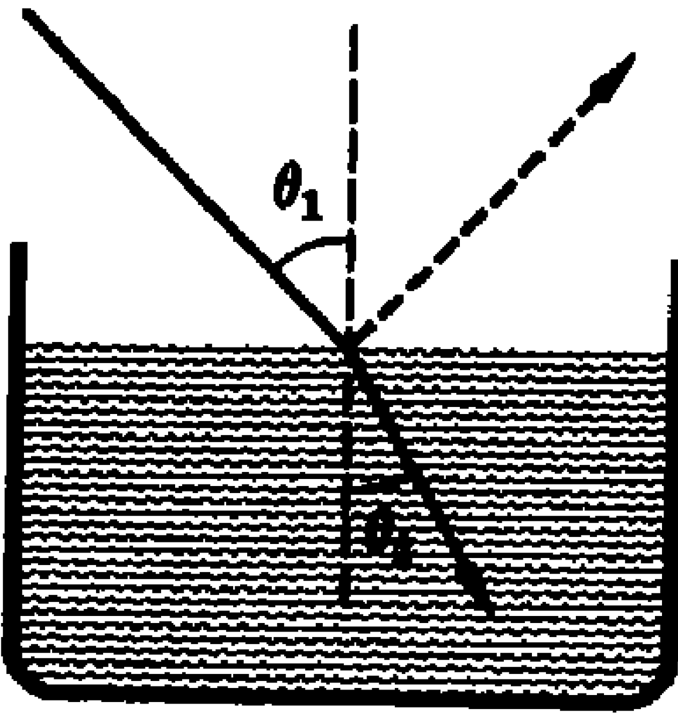
تعتبر حقيقة أن موجة الماء تنعكس بحيث تكون زاوية السقوط مساوية لزاوية الإنعكاس صحيحة على وجه العموم . فقد كنا نستطيع استعمال نفس طريقة التحليل لبيان أن أمواج الضوء يمكن أن تنعكس بنفس الطريقة . لاحظ أن الفرض الاساسى الوحيد الذى وضع هو أن مركبة السرعة العمودية على السطح قد انقلبت عند الانعكاس وأن المركبة الأخرى لم تتغير . ستكون النتيجة التى أوجدناها صالحة لأى نوع من الأمواج ينطبق عليه هذا الفرض . وقد أثبتت القياسات التى أجريت على الضوء والصور الأخرى للاشعاع الكهرمغناطيسى هذا الاستنتاج . يمكننا اذن صياغة القاعدة التالية :

قانون الانعكاس

زاوية السقوط تساوى زاوية الانعكاس

٢٣ - ٤ انكسار الضوء : قانون سنل

حين ينتقل شعاع ضوئى من الهواء الى الماء فان مساره ينحنى كما هو مبين فى الشكل ٢٣ - ٧ ويسمى هذا التغير فى اتجاه شعاع ما حين يمر من مادة الى أخرى **الانكسار**. الزاوية θ_1 هى بالطبع زاوية السقوط وتسمى الزاوية θ_2 زاوية الانكسار . هناك بعض الأشعة التى تصطدم مع سطح الماء ، التى تنعكس كما هو مبين بالشعاع المتقطع فى الشكل ٢٣ - ٧ ولكننا سنتجاهل هذا الآن .



شكل ٢٣ - ٧
عندما يمر شعاع من الضوء من مادة أقل كثافة ضوئية الى مادة أكثر كثافة ضوئية (من الهواء الى الماء مثلا) . فان الشعاع ينكسر نحو العمود المقام على السطح .

من المناسب أن نعتبر حركة صدور الموجة فى موجة مستوية لكى نجد علاقة بين θ_1 و θ_2 وذلك باستعمال الشكل ٢٣ - ٨ الذى يصور الموقف . سنعتبر أن الضوء يتحرك بسرعة v_1 فى المادة العليا وبسرعة v_2 فى المادة السفلى ، بحيث كانت v_1 أكبر من v_2 (إذا كان المادة العليا هواء فان $v_1 = c = 3\times10^8 m/s$) لابد أنك تستطيع اثبات أن الزوايا θ_1 و θ_2 هى نفسها المبينة فى جزئى الشكل . سنعتبر أيضا أن صدور الموجة ABC قد انتقل الى الوضع $A'B'C'$ بعد زمن قدره t ومن ثم يكون لدينا فى الشكل ٢٣ - ٨ ب

$$d = v_1 t \qquad \text{و} \qquad l = v_2 t$$

التى تؤول بعد قسمة احدى المعادلتين على الاخرى

$$\frac{d}{l} = \frac{v_1}{v_2}$$

علاوة على ذلك ، من الشكل ٢٣ – ٨ ب نرى أن

$$\frac{d}{BB'} = \sin\theta_1 \qquad \frac{l}{BB'} = \sin\theta_2$$

التى تصبح بعد قسمة احداهما على الأخرى ،

$$\frac{d}{l} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

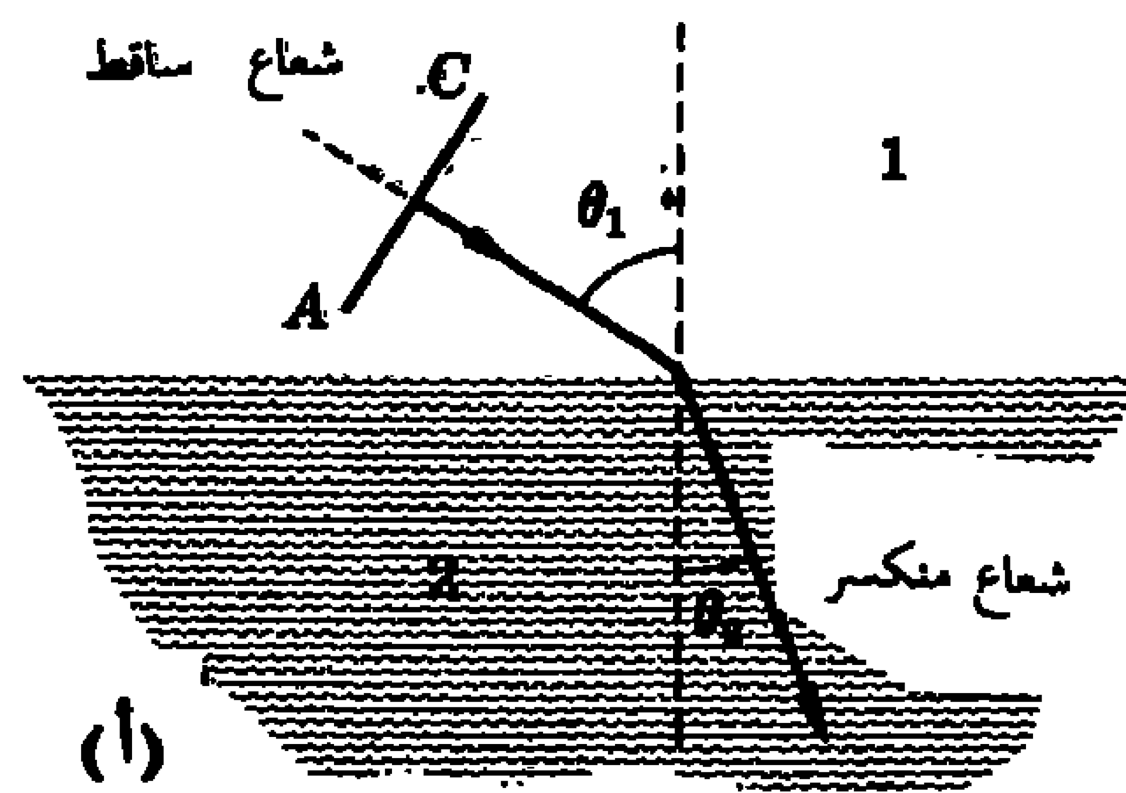
ولكن بما أن $d/l = v_1/v_2$ تصبح العلاقة ،

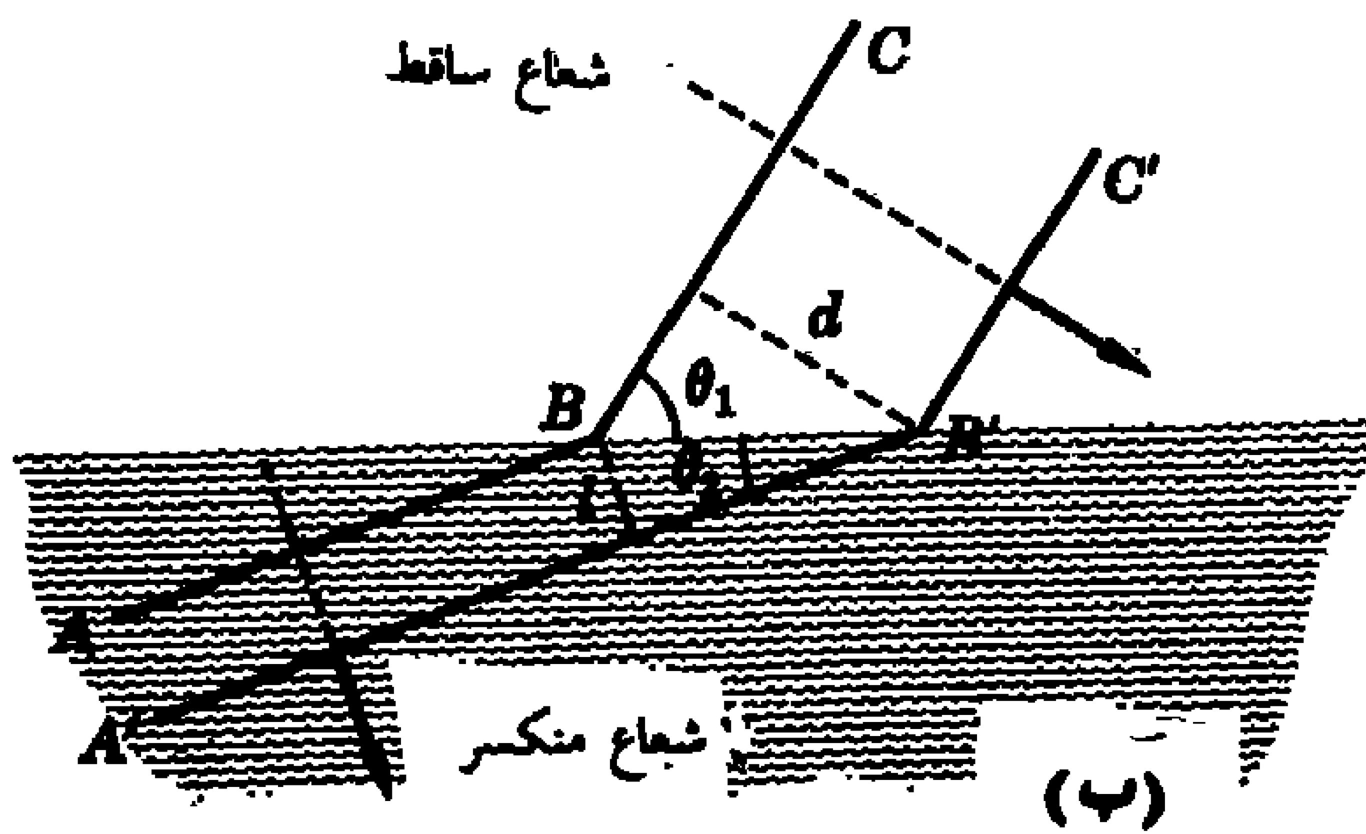
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \qquad (٢٣ - ١)$$

هذه العلاقة هى احدى صور **قانون سنل** . وفى أعم صورة يكتب هذا القانون لحالة تكون فيها المادة 1 فراغا . وفى تلك الحالة $v_1 = c$

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c}{v_2} = n \qquad (٢٣ - ٢)$$

شكل ٢٣ – ٨
حيث أن الموجة تنتقل بشكل أبطأ فى المادة السفلى عنها فى المادة العليا فان θ_2 تكون أصغر من θ_1





تعريف

تسمى الكمية n **معامل الانكسار المطلق للمادة 2** (أو بشكل أكثر عمومية معامل انكسار المادة 2) . يعتبر معامل الانكسار المطلق للمادة على أنه النسبة بين سرعة الضوء فى الفراغ وسرعة الضوء فى المادة . وقد سبق وأن وضعنا قائمة بقيم هذه الكمية لمواد مختلفة فى الجدول ٢٣ – ١ لاحظ أن معامل الانكسار المطلق يكون دائما أكبر من الوحدة أو يساويها ومن الطبيعى أن معامل انكسار الفراغ يجب أن يكون c/c. أو الوحدة .

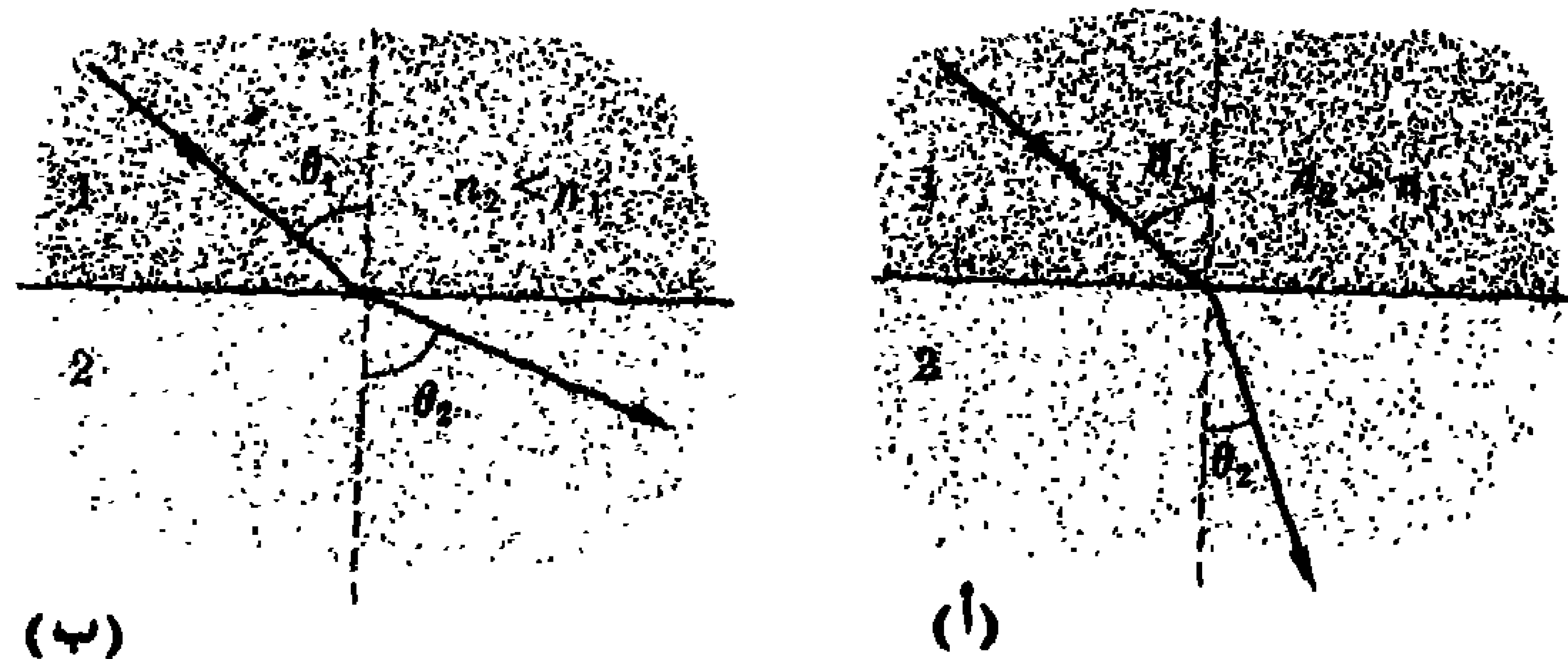
وكثيرا ما تسمى النسبة v_1/v_2 فى المعادلة (٢٣ – ١) معامل الانكسار النسبى وتبرز هذه المصطلحات لأن $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ بحيث أن $v_1/v_2 = n_2/n_1$ ومن ثم يمكن كتابة المعادلة (٢٣ – ١) على الصورة ..

قانون سنل

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad ٢٣ - ٣$$

والتى سنشير اليها كقانون سنل . فاذا كانت المادة 1 هواء تختصر هذه المعادلة الى المعادلة (٢٣ – ٢) ، وذلك لأن $n_1 = 1$

ومن هنا نرى أنه اذا كانت n_2 أكبر من n_1 فان $\sin\theta_1$ يكون أكبر من $\sin\theta_2$ وفى هذه الحالة تكون θ_1 أكبر من θ_2 وهذا ما يصوره الشكل ٢٣ – ٩أ وهو أكثر المواقف شيوعا . على أننا نعنى أحيانا بالحالة العكسية ، أى حين يكون n_2 أصغر من n_1 وهذا ما ينطبق على شعاع من الضوء ينتقل من الزجاج الى الهواء مثلا ، وعندئذ تتنبأ المعادلة(٢٣ – ٣) بأن θ_2 أكبر من θ_1 كما هو موضح فى الشكل ٢٣ – ٩ ب



شكل ٢٣ – ٩
اذا كان $n_2 > n_1$ فان الشعاع ينحنى نحو العمود بينما يحدث العكس اذا كان $n_2 < n_1$

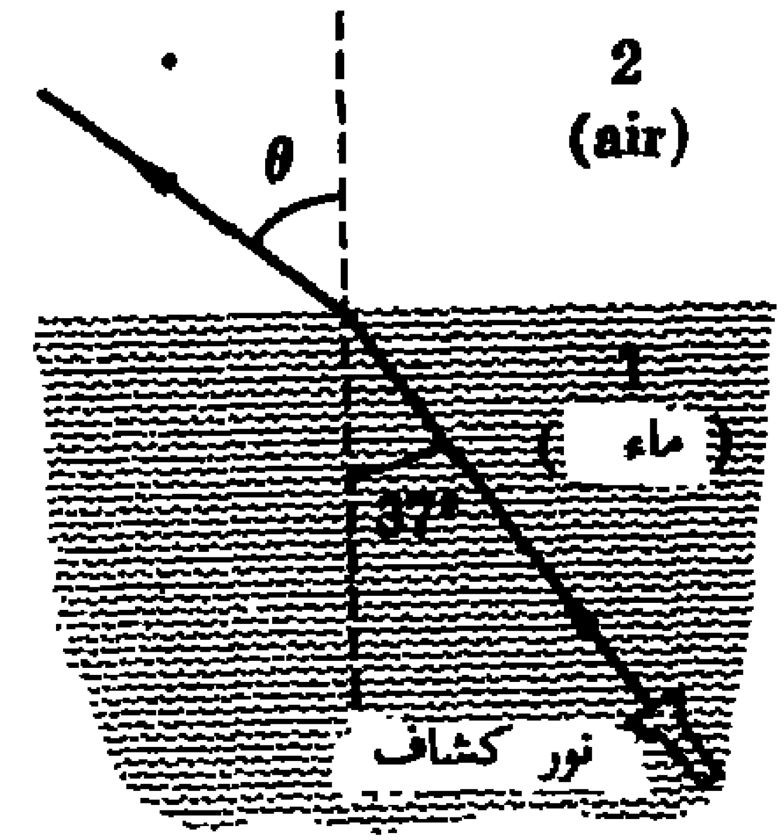
مثال توضيحى ٢٣ – ١ يقوم غواص تحت سطح المحيط بتوجية نور كشاف الى أعلى بزاوية تبلغ °37 مع الرأسى . ما هى الزاوية التى يخرج بها الضوء الى الهواء ؟

طريقة الحل : يوضح الشكل ٢٣ – ١٠ هذا الموقف . لاحظ أن المادة 1 هى الماء والمادة 2 هى الهواء بتطبيق قانون سنل ووضع $n_1 = 1.33$, $n_2 = 1.00$ نجد أن

$$1.33 \sin 37° = 1.00 \sin \theta$$

أو

$$\sin \theta = 0.80 \quad \text{أو} \quad \theta = 53°$$



شكل ٢٣ – ١٠
يرسل الكشاف شعاعا من تحت الماء بحيث ينحنى هذا الشعاع بعيدا عن العمود عندما يمر الهواء

مثال توضيحى ٢٣ – ٢ يسقط ضوء على سطح الماء فى طبق زجاجى له قاع مستو ومسطح كما هو مبين فى الشكل ٢٣ – ١١ .. ما هى الزاوية التى يخرج بها الضوء من قاع الطبق ؟

طريقة الحل : عند السطح هواء – ماء يكون لدينا

$$1.00 \sin \theta_1 = n_w \sin \theta_2$$

أما عند السطح المبين ماء – زجاج فان لدينا

$$n_w \sin \theta_2 = n_g \sin \theta_3$$

وحيث أن الكميات التى تساوى مقدارا مشتركا تكون فيما بينها متساوية فان :

$$1.00 \sin \theta_1 = n_g \sin \theta_3$$

لاحظ أن هذه المعادلة هى بالضبط العلاقة التى كان من الممكن الحصول عليها اذا لم يكن الماء موجودا واذا مر الضوء مباشرة الى الزجاج من الهواء .

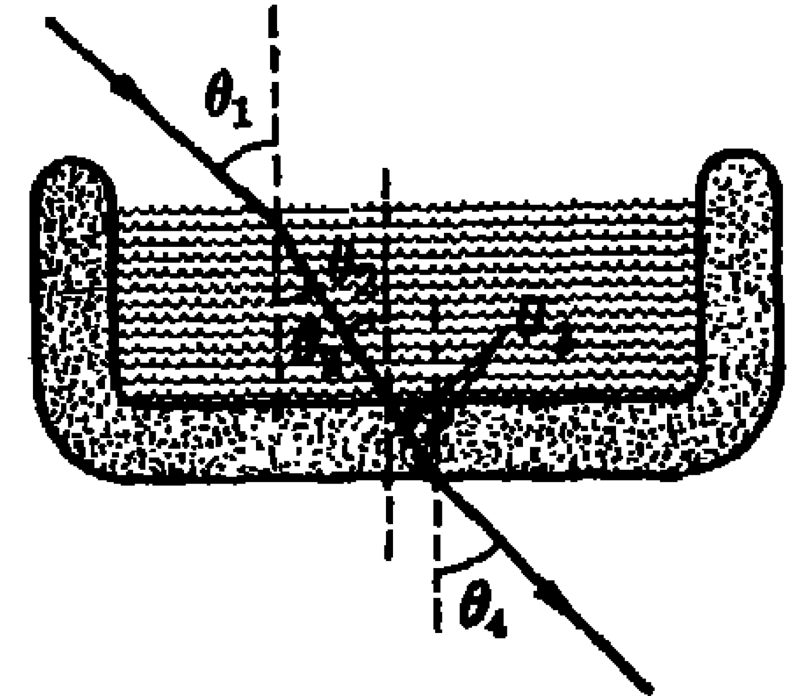
عند التقدم نحو السطح الأسفل زجاج – هواء يكون لدينا :

$$n_g \sin \theta_3 = 1.00 \sin \theta_4$$

بدمج هذه المعادلة مع المعادلة السابقة نجد أن

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_4$$

ومنها نجد أن $\theta_1 = \theta_4$



شكل ٢٣ – ١١
لا يتغير اتجاه حركة الشعاع الضوئى عند وضع لوح متواز من مادة شفافة . ملاحظة : $\theta_2 > \theta_3$

توضح هذه النتيجة الهامة أن الطبقة المتجانسة لمادة شفافة لا تغير اتجاه الشعاع الضوئى . على أن الشعاع تحدث له ازاحة جانبية عادة (لماذا ؟)

٢٣ – ٥ الانعكاس الكلى الداخلى

يدين الماس – بعيدا عن قيمته الرومانسية – بقدر كبير من جماله لظاهرة الانعكاس الكلى الداخلى ، فهذه الخاصية هى التى تجعل الماسات تتلألأ فى جميع

الاتجاهات . وكل ما هنالك آن شعاعا ضوئيا يصبح محبوسا داخل الماسة ، وحين يخرج فى النهاية فان خروجه يكون فى أى من الاتجاهات العديدة . ومن ثم تصدر البلورة ضوء (أو تتلألأ) فى اتجاهات عشوائية . هناك العديد من الحالات الاخرى التى يكون فيها الانعكاس الكلى الداخلى ذو أهمية . سنقوم الان بدراسة هذا النوع من سلوك الضوء بشيء من التفصيل .

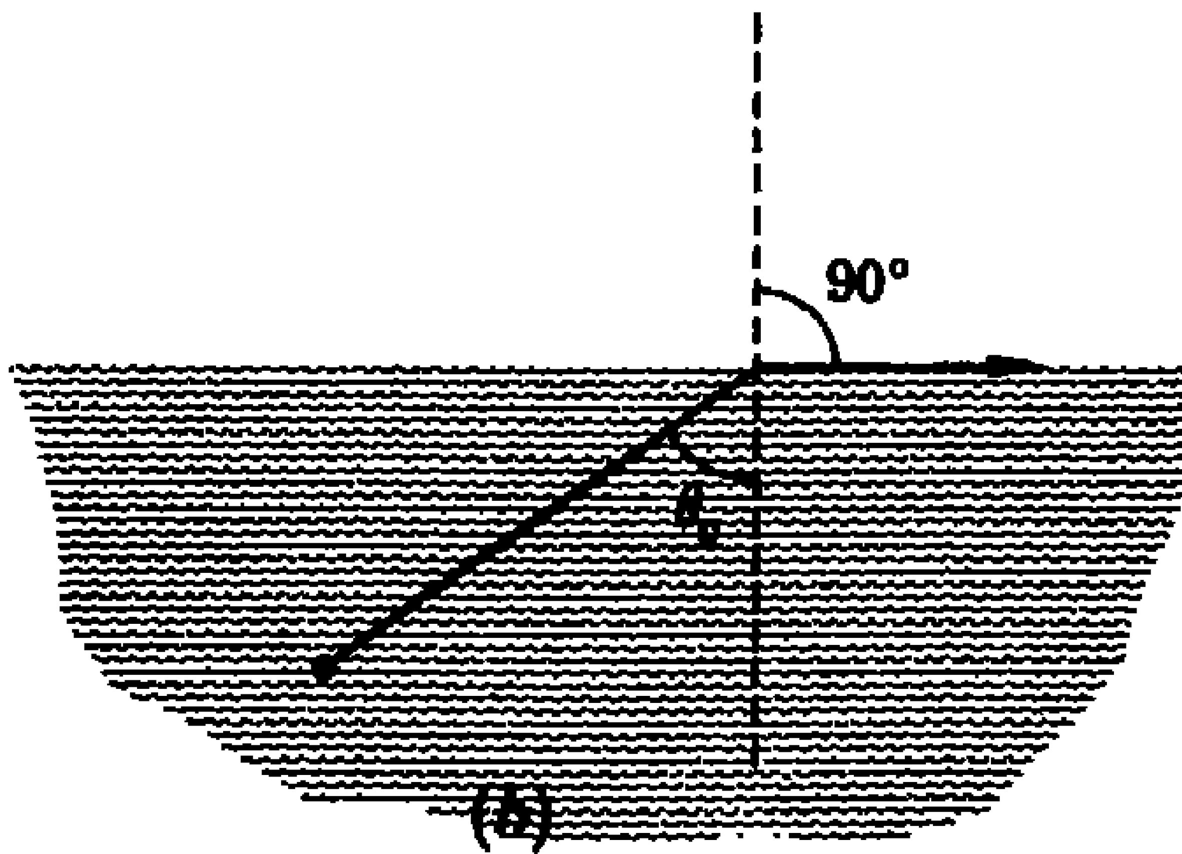
اعتبر مصدر للضوء O تحت سطح بحيرة كما يبين ذلك الشكل ٢٣ - ١٢ أ يفيد قانون سنل بأن

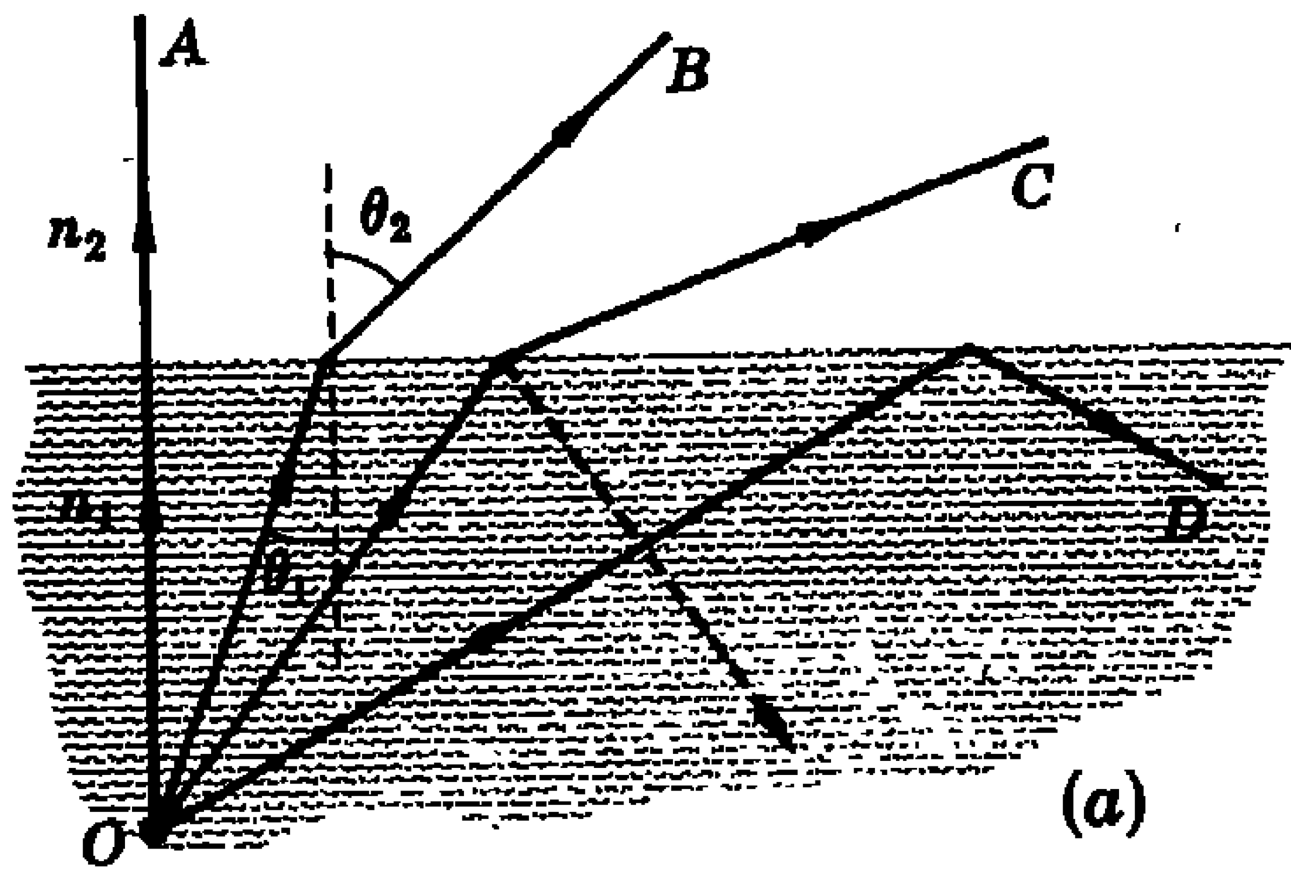
$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1$$

وحيث أننا نعتبر n_1 أكبر من n_2 فان θ_2 تكون أكبر من θ_1 كما هو مبين لاحظ ان الشعاع OC قد انحنى موازيا تقريبا لسطح الماء عند خروجه . من الواضح أن الحالة الحرجة المبينة فى الشكل ٢٣ - ١٢ب تحدث عندما $\theta_2 = 90°$ يمر الشعاع الخارج بمجرد مرور سطحى وعلى هذا فعندما $\theta_2 = 90°$

$$\sin 90° = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_c$$

شكل ٢٣ - ١٢
عندما تكون θ_1 أكبر من زاوية حرجة θ_c فان الشعاع ينعكس كليا داخليا





$$1.00 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_c \qquad (٢٣ - ٤)$$

أو

ومنها

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

اذا كانت θ_1 أكبر من θ_c ، الزاوية الحرجة ، فان قانون سنل يفيد بأن $\sin\theta_2$ أكبر من 1.00 ولكن $\sin 90°$ يساوى 1.00 وهى أكبر قيمة يمكن أن تكون لجيب الزاوية أى أن قانون سنل يفيد أنه من المستحيل أن يوجد شعاع منكسر اذا كانت θ_1

أكبر من θ_c ومن السهل فهم هذا بالرجوع الى الشكل ٢٣ – ١٢ ب .. عندما تكون $\theta_1 = \theta_c$ فان الشعاع المنكسر يخرج بالكاد من سطح الماء أما اذا كانت θ_1 أكبر من θ_c فان الشعاع لن يخرج من الماء بل سينعكس كما هو مبين بالشعاع OD فى الشكل .

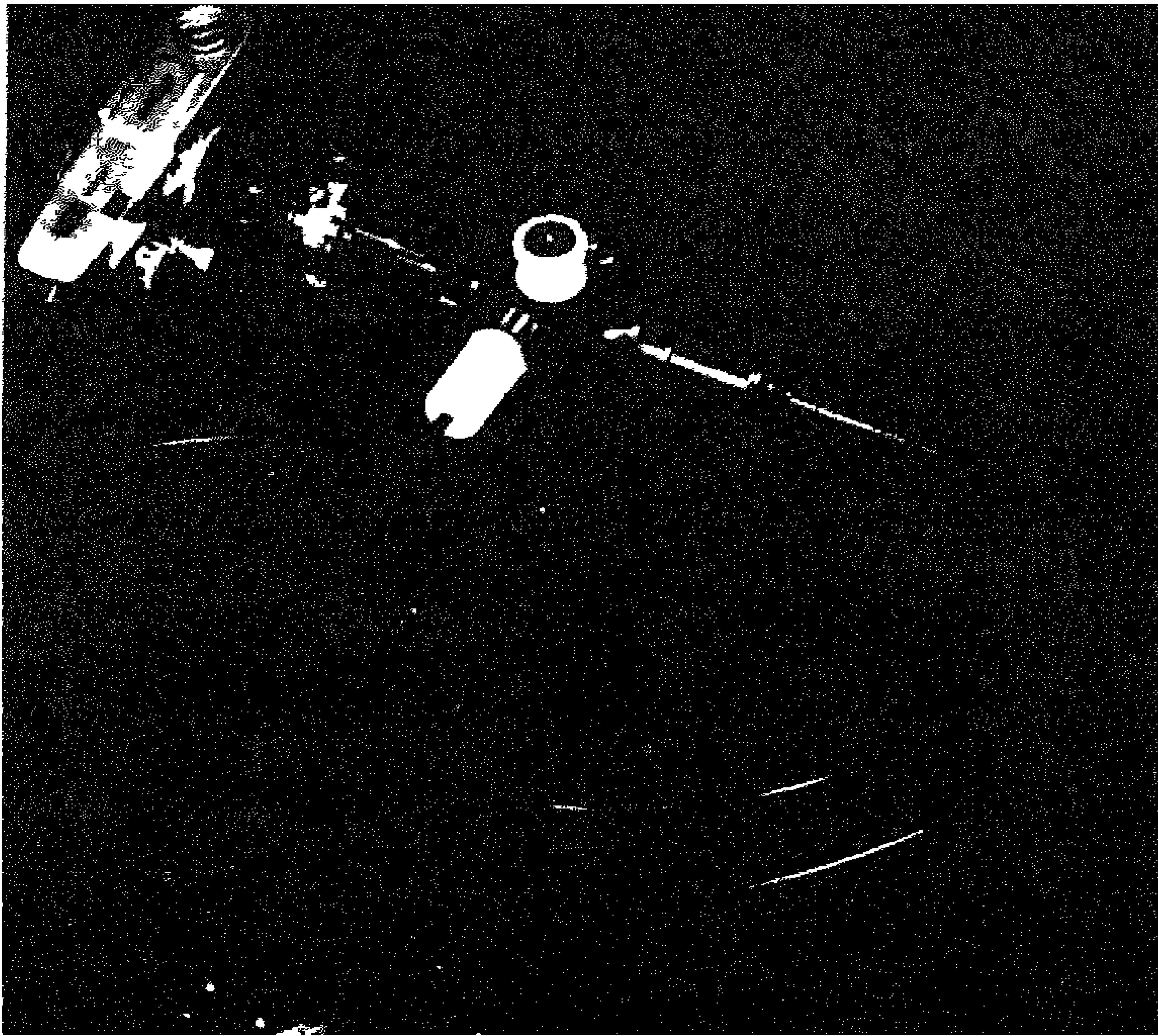
من هنا نرى أن شعاع الضوء الذى يحاول أن ينتقل من مادة كثيفة ضوئيا (مادة ذات معامل انكسار كبير) الى مادة أقل كثافة ضوئية سينعكس كليا داخليا اذا زادت زاوية السقوط عن الزاوية الحرجة المعطاة بالمعادلة (٢٣ – ٤) . لاحظ أن الانعكاس الكلى الداخلى يمكن أن يحدث فقط اذا كان الشعاع ينتقل من الماء الى الهواء وليس العكس . فى كثير من الحالات يكون الهواء هو المادة الثانية ، أى أن $n_2 = 1.00$ وعندئذ $\sin \theta_c = 1/n_1$ تبلغ الزوايا الحرجة النموذجية للماء 49° ، للزجاج التاجى 42° وللماس 24° ولما كان معامل انكسار الماس بهذا الكبر فان الزاوية الحرجة له تكون صغيرة ، أى أن شعاع الضوء يجب أن يصطدم مستقيما تقريبا بأسطحه حتى يتمكن من الخروج الى الهواء . ويقوم الجواهرى بقطع البلورة بطريقة معينة بحيث أنه بمجرد دخول شعاع ضوئى الى داخلها ، فان فرصته فى أن يصطدم بالسطح بزاوية تبلغ 24° أو أقل تكون ضئيلة جدا . نتيجة لهذا ينعكس الشعاع الحبيس عدة مرات داخل البللورة قبل أن يتمكن من الهرب .

يجعل الانعكاس الكلى الداخلى من الممكن نقل الضوء بأنابيب حول الزوايا . باستخدام قضيب زجاجى ينثنى بلطف ، فان الضوء الذى يدخل من أحد الاطراف ينعكس كليا داخليا حول المنحنى كما هو مبين فى الشكل ٢٣ – ١٣ . وباستخدام حزمة من الألياف الزجاجية الضيقة فانه يمكن نقل صورة مركبة لجسم ما بالانابيب من مكان لآخر ، وتسمى هذه النبيطة **انبوبة ضوئية** يوضح الشكل ٢٣ – ١٣ ب مثالا لاستخدامها .

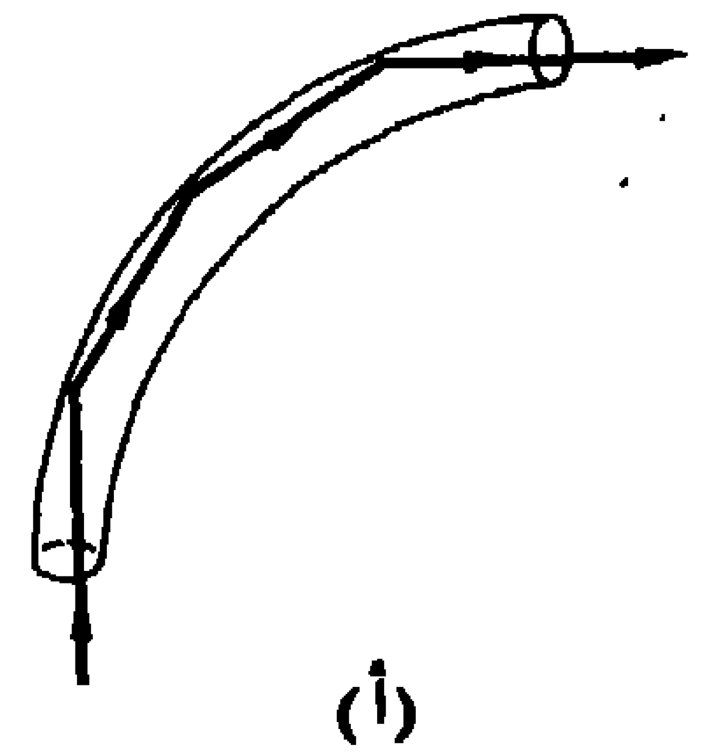
٢٣ – ٦ المرآة المستوية

بما أننا قد أصبحنا نفهم ظاهرتى الانعكاس والانكسار فاننا معدين لكى ندرس المعالم الهامة للعدسات والمرايا وسنبدأ أولا باعتبار كيفية تكون الصور بالمرآة المستوية .

انك تنظر كل يوم الى نفسك فى مرآة مستوية وترى صورة وجهك أمامك . وفى الحقيقة لو أنك توقفت لكى تفحص ما تفعله بدقة فستدرك أن صورة وجهك تقع خلف سطح المرآه وأنها تقع خلف المرآة بمسافة تساوى المسافة التى يقع بها وجهك امام المرآة . لنفحص هذا الانعكاس فى مرآة مستوية حتى نفهم بوضوح لماذا ترى الصورة كما هى .



(ب)



(أ)

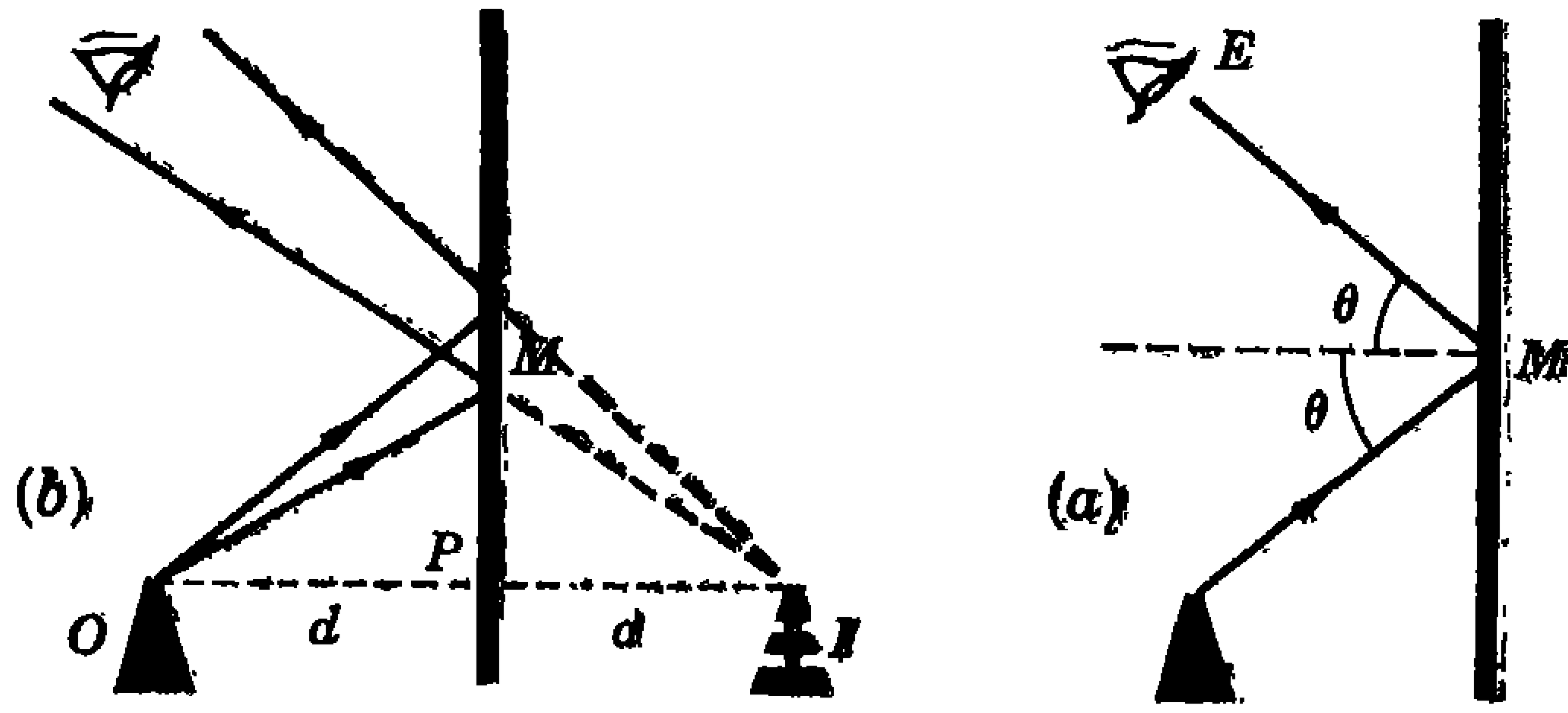
شكل ٢٣ - ١٣

يدفع الضوء لتتبع ليفه زجاجية بواسطة الانعكاس الكلى الداخلى . (ب) منظار البطن (جاستروسكوب) من الألياف الزجاجية متصل بآلة تصوير . هناك مصدر للضوء خارج الصورة الى اليسار يقوم بامداد ضوء لحزمة الالياف عند القاع . تدخل هذه الانبوبة الضوئية خلال الحلق الى المعدة . الضوء المنعكس من جدران المعدة سينعكس عائدا لأعلى خلال الألياف المركزية للحزمة مكون صورة على الفيلم فى آلة التصوير . ويمكن أيضا إجراء ملاحظات مرئية مباشرة . (شركة أمريكان اوبتيكال . قسم بصريات الألياف) .

افترض انك وضعت جسما أمام المرآة كما فى الشكل ٢٣ - ١٤ أ وانك أردت أن تعرف أين سترى العين المرسومة موقع الصورة المتكونة . أنت حينما ترى طرف الجسم فان عينك ترى شعاعا ضوئيا قد ابتعث أو انعكس من طرف الجسم .أما اذا رأيت صورة طرف الجسم فى المرآة فانت فى الوقع ترى الضوء الصادر من طرف الجسم بعد انعكاسة فى المرآة كما فى الشكل ٢٣ - ١٤ أ . من الواضح أنك فى نفس الشكل ترى الجسم كما لو كان فى نفس الاتجاه العام الذى يأتى منه الشعاع ، ومن ثم فأنت تعرف أن صورة طرف الجسم ستكون فى مكان ما على طول الخط EM أو امتداده .

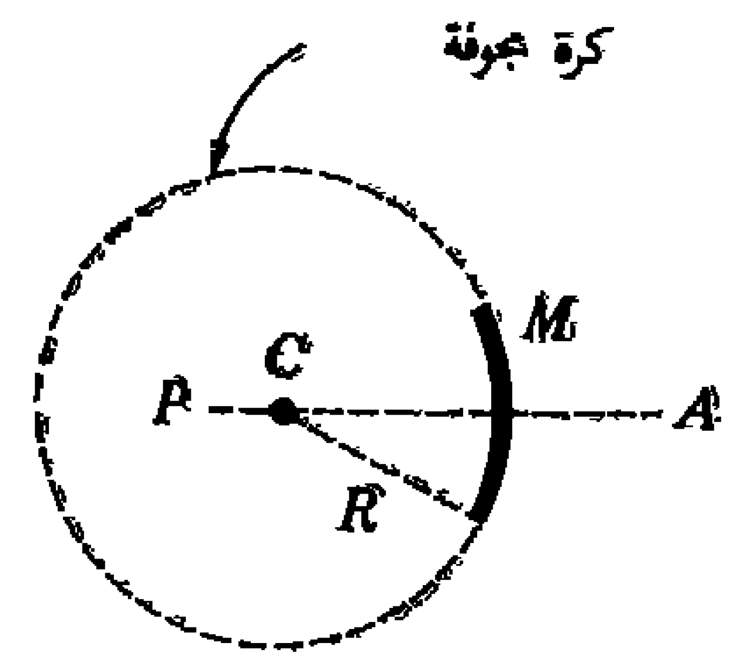
بالرجوع الى الشكل ٢٣ - ١٤ أ يمكنك معرفة أين ستتكون صورة الجسم بدقة . يظهر الشعاعان المنعكسان المبينان للعين على أنهما قادمان من نقطة واحدة I وهى النقطة التى تظهر عندها صورة طرف الجسم . فى الحقيقة ، يمكن استخدام نفس الفكرة فى بيان أن صورة الجسم كلها ستظهر عند I كما هو موضح . من هندسة المثلثين IMP, OMP يتضح أنه لو كان بعد الجسم هو $d$cm أمام المرآة فان الصورة ستكون على مسافة $d$cm خلف المرآة .

شكل ٢٣ - ١٤
تكون الصورة المتكونة فى المرآة المستوية خلف المرآة على نفس البعد الذى يقع فيه الجسم أمامها



صورة تقديرية او (تخيلية)

وهذا النوع من الصور التى لا يمر خلالها حقيقة أى من الاشعة المرئية يسمى صورة تقديرية أو تخيلية . بصورة أخرى فان الأشعة التى تصل الى العين لم تأت فى الواقع من النقطة التى ترى الصورة فيها . وليست هناك مطلقا أية امكانية أن نضع صفحة من الورق عند I خلف المرآة بحيث يظهر عليها جسم مضاء . ولكن العقل يتخيل بمجرد أن الضوء يأتى من I ومن الصحيح دائما بالطبع أن صورة جسم حقيقى كما ترى بالانعكاس فى مرآة مستوية هى صورة تقديرية وتكون دائما خلف المرآة على نفس البعد بالضبط الذى يقع فى الجسم أمامها .



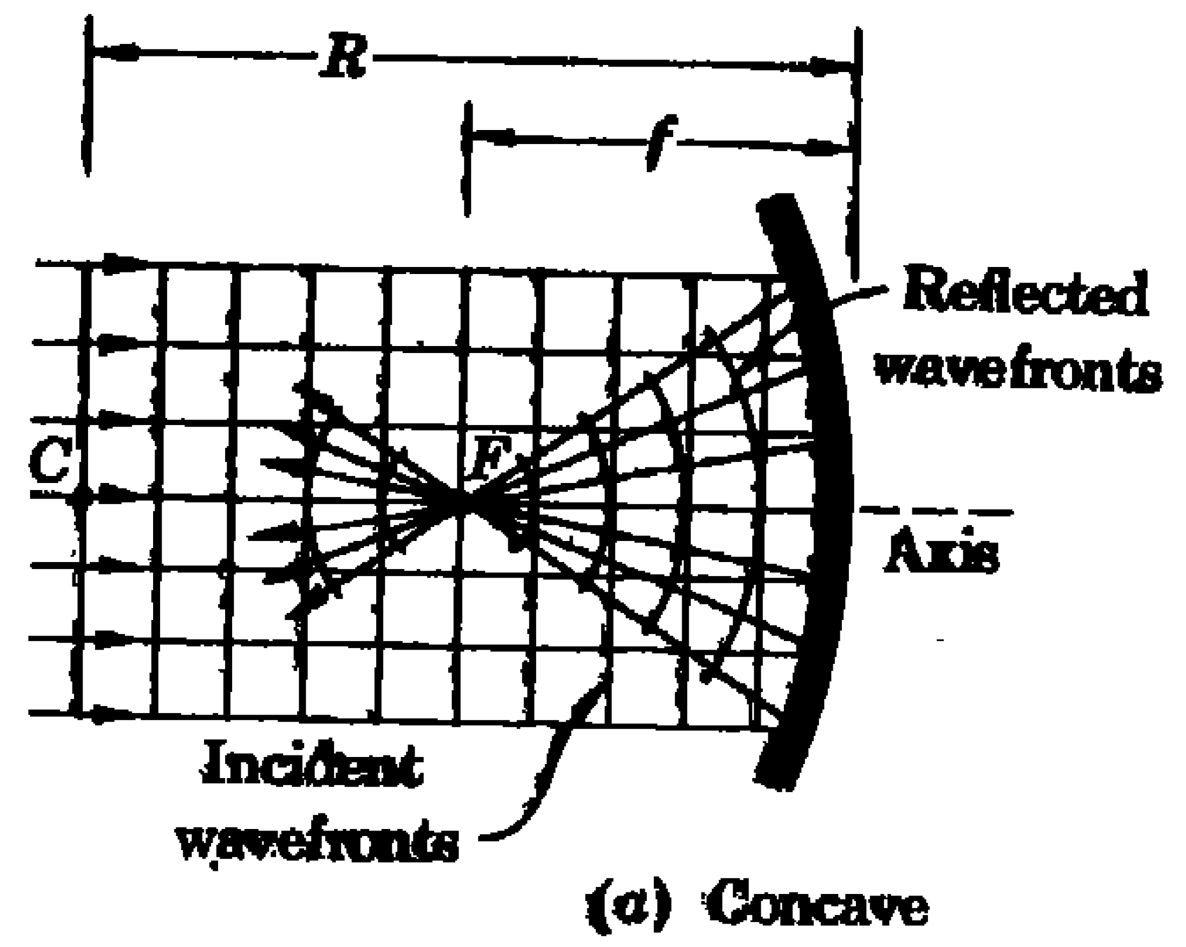
٢٣ - ٧ بؤرة مرآة كروية مقعرة

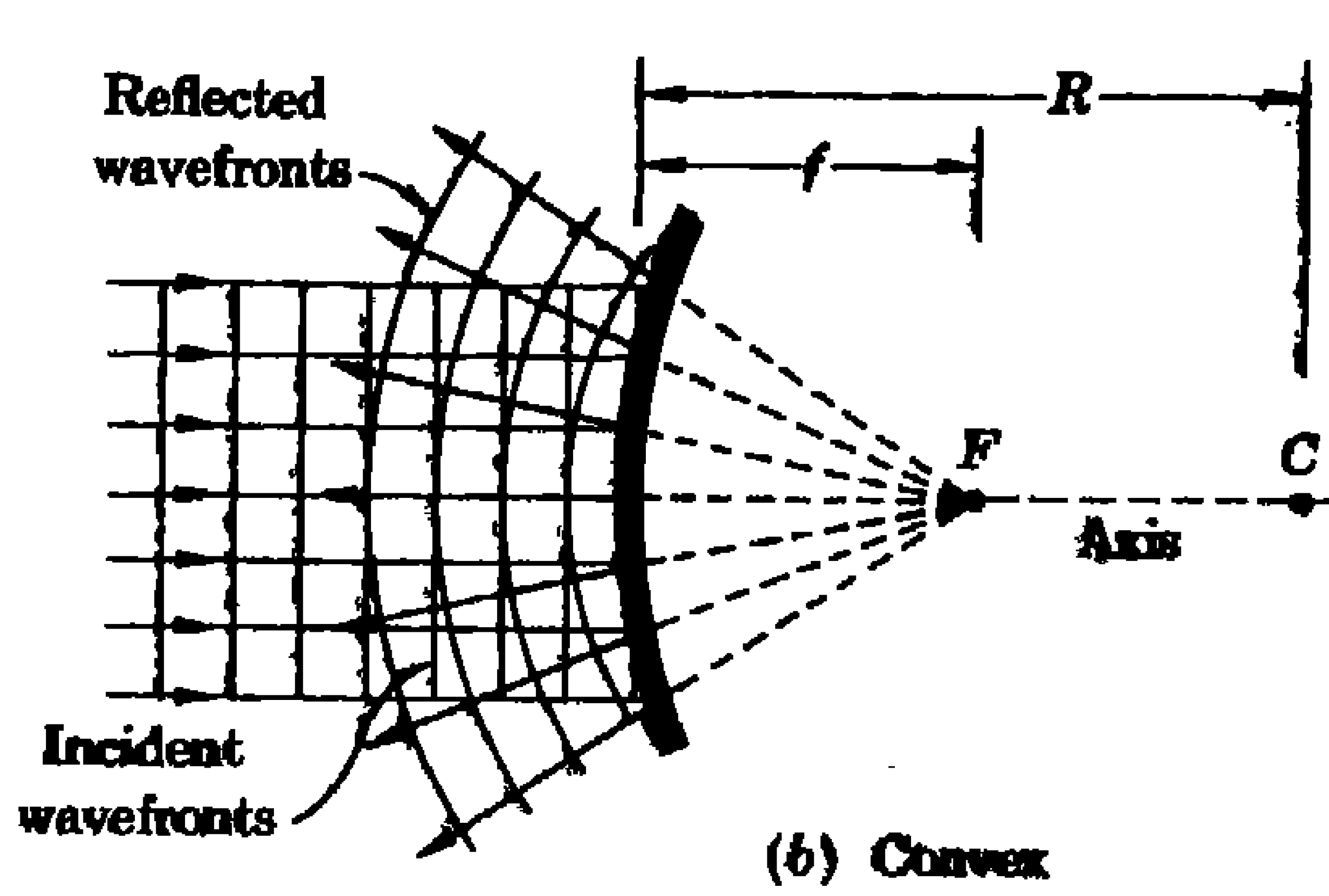
شكل ٢٣ - ١٥
المرآة الكروية M هى جزء من كرة مجوفة يكون نصف قطر المرآة هو R ومركزها عند النقطة C أما محورها الرئيسى فهو الخط $\overline{PA}$

على الرغم من أن المرايا المستوية أو المسطحة مألوفة لدينا جميعا إلا أن المرايا الكروية تعتبر بشكل أو بآخر مجرد حب استطلاع للكثيرين ، على أنها كثيرا ما تستخدم للأغراض الصناعية ولذا سنقوم بوصف عملها . تعتبر المرآة الكروية ، فى الواقع ، جزء من سطح كرة مجوفة كما يبين الشكل ٢٣ - ١٥ . لو أن المرآة تعكس من على سطحها الداخلى لعكست الضوء كما فى الشكل ٢٣ - ١٦ أ ومثل هذه المرآة تسمى **مرآة كروية مقعرة** . أما حين تعكس من على سطحها الخارجى فانها تعكس الضوء كما فى الشكل ٢٣ - ١٦ ب وتسمى المرآة من هذا النوع **مرآة كروية محدبة** .

لاحظ أنه عند رسم الشكل ٢٣ - ١٦ افترضنا أن الضوء قادم من مصدر بعيد بحيث تكون الأشعة متوازية وتكون صدور الموجة مستقيمة أو مستوية . (تذكر أن أمواج الماء تفقد انحناءها كلما بعدت أكثر فأكثر عن مصدر الموجة .) يوضح الشكل أن الأشعة المتوازية التى تنتقل على طول المحور الرئيسى للمرآة (كما عرف فى التعليق على الشكل ٢٣ - ١٥) سوف تنعكس جميعها الى أو من نقطة F على وجه التقريب كما سنرى . الآن . تسمى هذه النقطة التى ينعكس اليها الضوء القادم من جسم بعيد بواسطة مرآة مقعرة **البؤرة** (أو **النقطة البؤرية**) للمرآة . لو كان علينا أن نعكس ضوء الشمس بواسطة مرآة مقعرة فان الضوء سينعكس فى نقطة ضئيلة (وهى صورة الشمس) قريبة جدا من بؤرة المرآة . وسبب هذا أن أمواج

تعريف





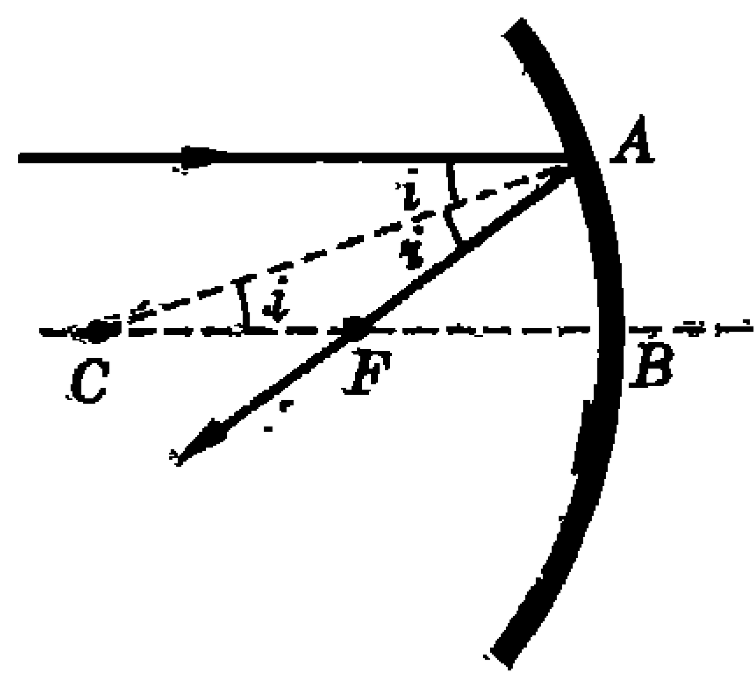
شكل ٢٣ — ١٦
يتجمع الضوء المنعكس من على مرآة مقعرة فى البؤرة بينما ينعكس الضوء من مرآة محدبة بحيث يبدو متفرقة من البؤرة

(أ) مقعرة ، (ب) محدبة
(١) صدور الموجة المنعكسة ،
(٢) محور ، (٣) صدور الموجة الساقطة

الضوء الصادرة من جسم بعيد كالشمس لابد وأن تكون مستوية تقريباً حين تصل الى الأرض .

وتكون الأشعة الصادرة من الشمس البعيدة أقرب ما تكون متوازية لدرجة يمكن اعتبارها كذلك .

لقد سألنا الطالب حتى الآن أن يتقبل التأكيدات السابقة بدون برهان . على أنه من أبسط الأمور أن نصور تماما كيف يمكن لثلاثة أنواع خاصة من العدد اللانهائى للأشعة الصادرة من مصدر ما أن تنعكس بواسطة مرآة مقعرة ؛ فاذا عرف هذا لأصبح من السهل أن نتحقق من موضع الصورة المتكونة بمثل تلك المرآة . سنرى الآن كيف تقوم المرآة المقعرة بعكس هذه الأشعة الثلاثة الهامة .



شكل ٢٣ — ١٧
ينعكس الشعاع الموازى للمحور الرئيسى لمرآة مقعرة ليمر خلال النقطة البؤرية

اعتبر أولاً ؛ الشعاع المبين فى شكل ٢٣ — ١٧ ، وهو مواز لمحور المرآة ويصطدم بها عند النقطة A . لنرسم الآن نصف القطر CA من مركز الكرة التى تعتبر المرآة جزء منها . وحيث أن CA نصف قطر فى الكرة لذا فهو عمودى على سطح المرآة عند A . يصنع الشعاع المنعكس مع العمود المقام عند A^1 نفس الزاوية التى يصنعها الشعاع الساقط وذلك لأن زاوية السقوط على أى سطح عاكس مصقول تساوى زاوية الانعكاس ، وعلاوة على ذلك ، حيث أن الشعاع القادم مواز للمحور CB' فان الزاوية عند C يجب أن تكون أيضا i كما هو موضح .

المثلث CFA هو مثلث متساوى الساقين CF يجب أن تساوى FA ولكن اذا كانت الزاوية i صغيرة جدا فان المسافة FA هى بالتقريب المسافة FB ؛ ومن ثم فأى شعاع مواز للمحور وليس بعيدا عنه سينعكس خلال نقطة F تقع فى منتصف المسافة بين سطح المرآة B ومركز الكرة التى تشكل المرآة جزء منها . أو بطريقة أخرى اذا كان نصف قطر الانحناء للمرآة هو R فإن الأشعة الموازية لمحور المرآة سوف تنعكس

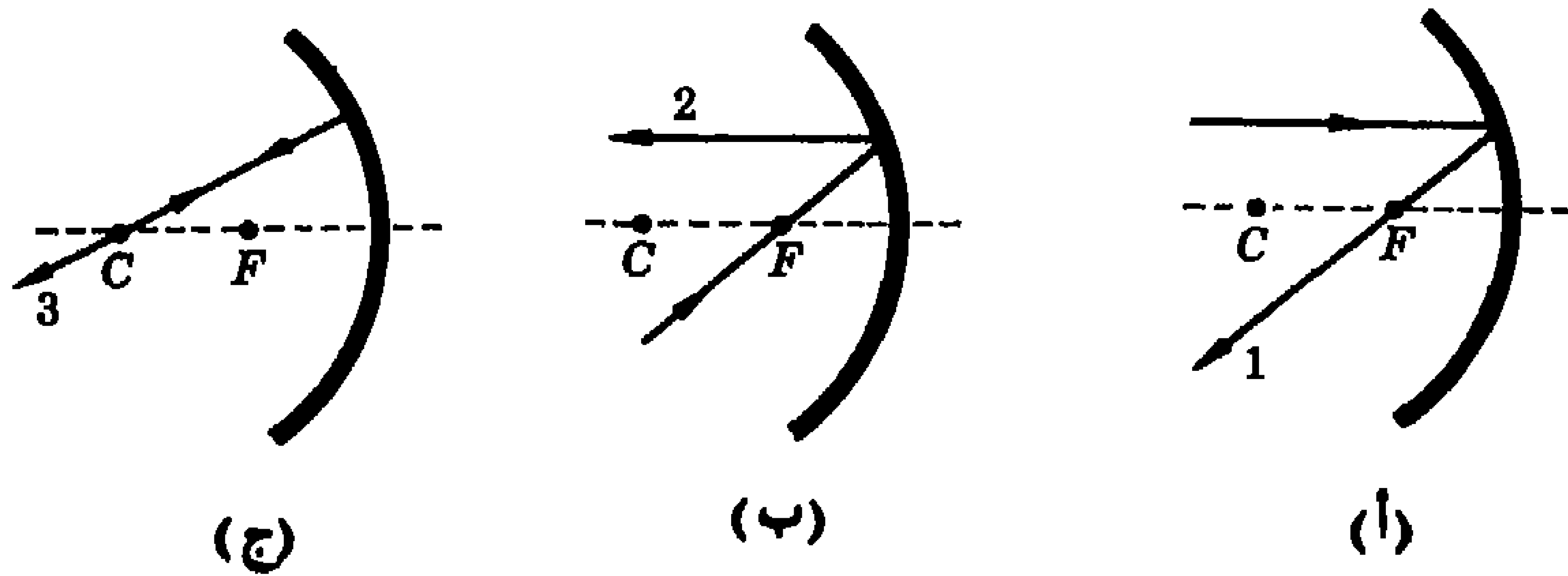
خلال نقطة F تبعد مسافة $\overline{FB} = \frac{1}{2}R$ عن المرآة. وهذه النقطة ، وهى النقطة التى تتركز فيها الاشعة المتوازية فى بؤرة هى بؤرة المرآة أما البعد $\overline{FB}$ فيسمى **البعد البؤرى** للمرآة وعليه فان $f = \frac{1}{2}R$

البعد البؤرى

ليس صحيحا تماما – بالطبع – أن جميع الأشعة الموازية للمحور تتركز عند نقطة البؤرة بالضبط فقد اتبع تقريب معين للوصول الى هذه النتيجة . لو أن المسافة AB فى الشكل ٢٣ – ١٧ كانت كسرا صغيرا من قطر الدائرة فان التقريب يكون جيدا تماما . على انه لابد من رسم حالة شعاع ينعكس بزاوية $i \approx 90°$ لترى أنه فى تلك الحالة لن ينعكس الشعاع خلال البؤرة ، ولهذا كانت المرايا الكروية المفيدة عبارة عن جزء صغير جدا من كرة أما المرايا الكروية الضخمة فتعطى صورا مشوشة ، ولكن المرايا التى لها شكل القطع المكافىء فانها لا تعانى من هذا العيب الا أن سعرها مرتفع .

٢٣ – ٨ الأشعة المنعكسة الثلاثة وتكوين الصورة

نعرف الآن الشعاع الموازى لمحور مرآة كروية وقريب منه جدا يمكن اعتبار أنه ينعكس خلال نقطة البؤرة . هناك أيضا شعاعان آخران يمكن تعقبهما بسهولة ، ويوضح الشكل ٢٣ – ١٨ أ الى (حـ) كل هذه الأشعة الثلاثة .



شكل ٢٣ – ١٨
يمكن بسهولة رسم الأشعة الثلاثة المبينه بواسطة مسطرة إذا كان كل من مركز المرآة C وبؤرتها F معلوماً .

الشعاع 1 ، فى الجزء أ تمت مناقشته من قبل . أما الشعاع 2 فى الجزء (ب) فهو عكس حالة الشعاع 1 تماما . وكل الاعتبارات الهندسية التى قيلت فى 1 تنطبق على 2 . الشعاع 3 فى الجزء (حـ) يمر خلال مركز انحناء المرآة ثم يصطدم بالمرآة ، ولما كان ينتقل على طول نصف قطر لسطح المرآة ، فهو يصطدم بالمرآة عموديا ثم ينعكس مرتدا على اعقابه تماما كما هو مبين لدينا اذن القواعد التالية للمرايا المقعرة

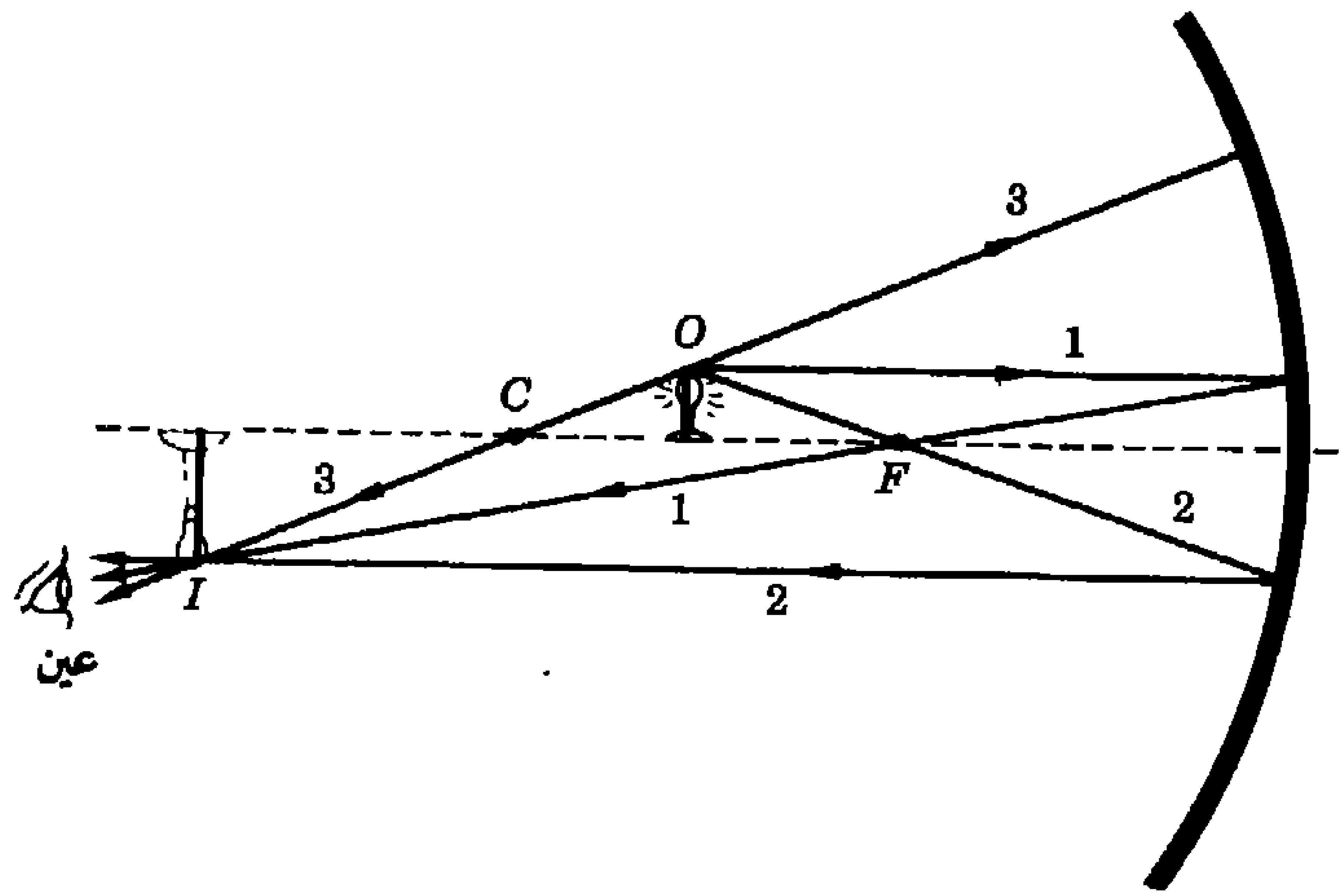
ينعكس الشعاع الموازى لمحور المرآة خلال البؤرة .

ينعكس الشعاع المار خلال البؤرة موزايا لمحور المرآة .

ينعكس الشعاع المار خلال مركز انحناء المراة مرتدا على أعقابه خلال مركز الانحناء

ويمكننا الآن استخدام هذه القواعد لتحديد مواقع الصور .

افترض أننا نريد ايجاد الصورة المتكونة بالمرآة للجسم O المبين فى الشكل ٢٣ – ١٩ . وليكن هذا الجسم هو مصباح اضاءة . سيقوم المصباح ببث الضوء فى جميع الاتجاهات على أننا نعرف كيف نتناول ثلاثة فقط من ملايين الأشعة التى يمكن رسمها صادرة من المصباح . تنتقل هذه الأشعة الثلاثة كما هو مبين فى الشكل ٢٣ – ١٩ ، حيث نرى أنها بالضبط الأشعة التى تحددها القواعد التى ذكرناها وعليك أن تتبع كل شعاع على حدة حتى تتأكد أنه مرسوم بطريقة صحيحة . ولايلزم سوى معرفة موقع كل من C و F حتى نرسم هذه الأشعة باستعمال المسطرة .



شكل ٢٣ – ١٩
تتكون صورة حقيقية I للجسم O . تتبع الأشعة الثلاثة الصادرة من الجسم

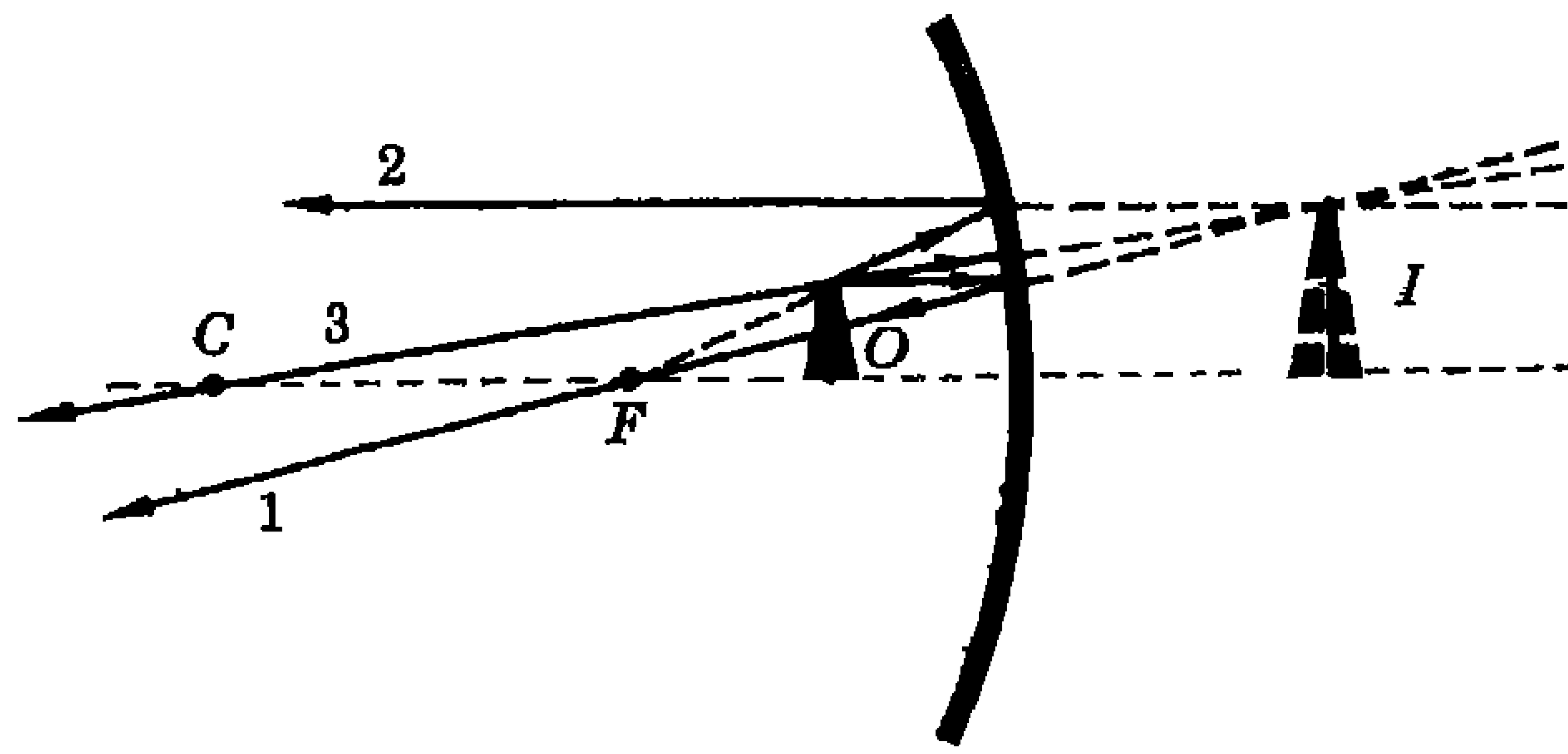
لو أنك الآن وضعت عينك فى الموقع المشار اليه لبدا لك أن الأشعة الثلاثة صادرة من النقطة I ، بل انك سترى فى الواقع مصباح الاضاءة عند I وهذا ما يسمى صورة الجسم الموجود عند O . علاوة على ذلك ، حيث أن الأشعة الضوئية تتجمع حقيقة عند النقطة I ثم تمر خلالها ، لذا فعند وضع صفحة من الورق عند I سنلاحظ وجود صورة مضيئة للمصباح الأصلى وستكون هذه **صورة حقيقية** : عند الصورة الحقيقية يمر الضوء حقيقة خلال النقطة ليولد الجسم . لاحظ الفرق بينها وبين الصورة التقديرية التى ناقشناها فى حالة المرآة المستوية .

تعريف

افترض الآن أن المصباح كان موضوعا عند طرف العمود المثل فى شكل ٢٣ – ١٩ ستصدر الاشعة الضوئية من العمود كما تصدر من المصباح (قد يصطدم ضوء المصباح بالعمود ثم ينعكس عليه ، على سبيل المثال ، فيبدو كما لو كان صادرا من العمود نفسه أى سيبدو كما لو كان ضوء مبتعثا وليس منعكسا) . يمكننا معالجة كل جزء صغير من العمود كمصدر جديد للضوء ونجد صورته . عليك أن تتبع قليلا

من الأشعة حتى تثبت لنفسك أن صورة العمود تقع عند الصورة المبينة عند I ومن الآن فصاعدا سنقوم بتحديد نقطة واحدة لاية صورة ثم نرسم على الفور باقى الصورة بنفس الطريقة .

اعتبر الموقف المبين فى الشكل ٢٣ – ٢٠ حيث رسمت الأشعة الثلاثة مرة أخرى ولكن الشعاع 2 لايمر الآن خلال البؤرة وهو فى طريقه الى المرآة وذلك لأن الجسم يقع داخل البعد البؤرى . على أنه لا يزال يبدو كما لو كان قادما من البؤرة وينعكس موازيا للمحور كما كان دائما . لاحظ أن الاشعة الثلاثة 3,2,1 تبدو على أنها قادمة من الصورة I كما فى الشكل ، ومن ثم ترى العين الصورة خلف المرآة فى هذه الحالة . مع ملاحظة أن الصورة تقديرية (تخيلية) ، معتدلة (الجانب الصحيح الى أعلى) ومكبرة (أكبر من الجسم .



شكل ٢٣ – ٢٠
تبدو الأشعة الثلاثة كما لو كانت قادمة من الصورة التقديرية I لاحظ بشكل خاص الشعاعين 3,2

٢٣ – ٩ معادلة المرآة

لنرجع الآن الى المثال الموضح فى الشكل ٢٣ – ٢١ حتى نتمكن من اشتقاق معادلة رياضية تصف موقع الصورة . ليس الشعاع ABE فى الجزء (أ) شعاعا عاديا ولكنه انعكس بحيث كانت الزاوية ABH تساوى الزاوية FBE ولهذا فالمثلثان المظللان فى الشكل ٢٣ – ٢١ أ متشابهان وبأخذ نسب الأضلاع المتناظرة نجد أن ،

$$\frac{O}{I}=\frac{p}{i}$$

فى الشكل ٢٣ – ٢١ ب يكون المثلثان المظللان أيضا متشابهين ومن ثم

$$\frac{O}{I}=\frac{\overline{HF}}{\overline{FG}}$$

ولكن $\overline{HF}$ هى بالضبط $p-f$ هى تقريبا f وبهذا التقريب نجد أن :

$$\frac{O}{I}=\frac{p-f}{f}$$

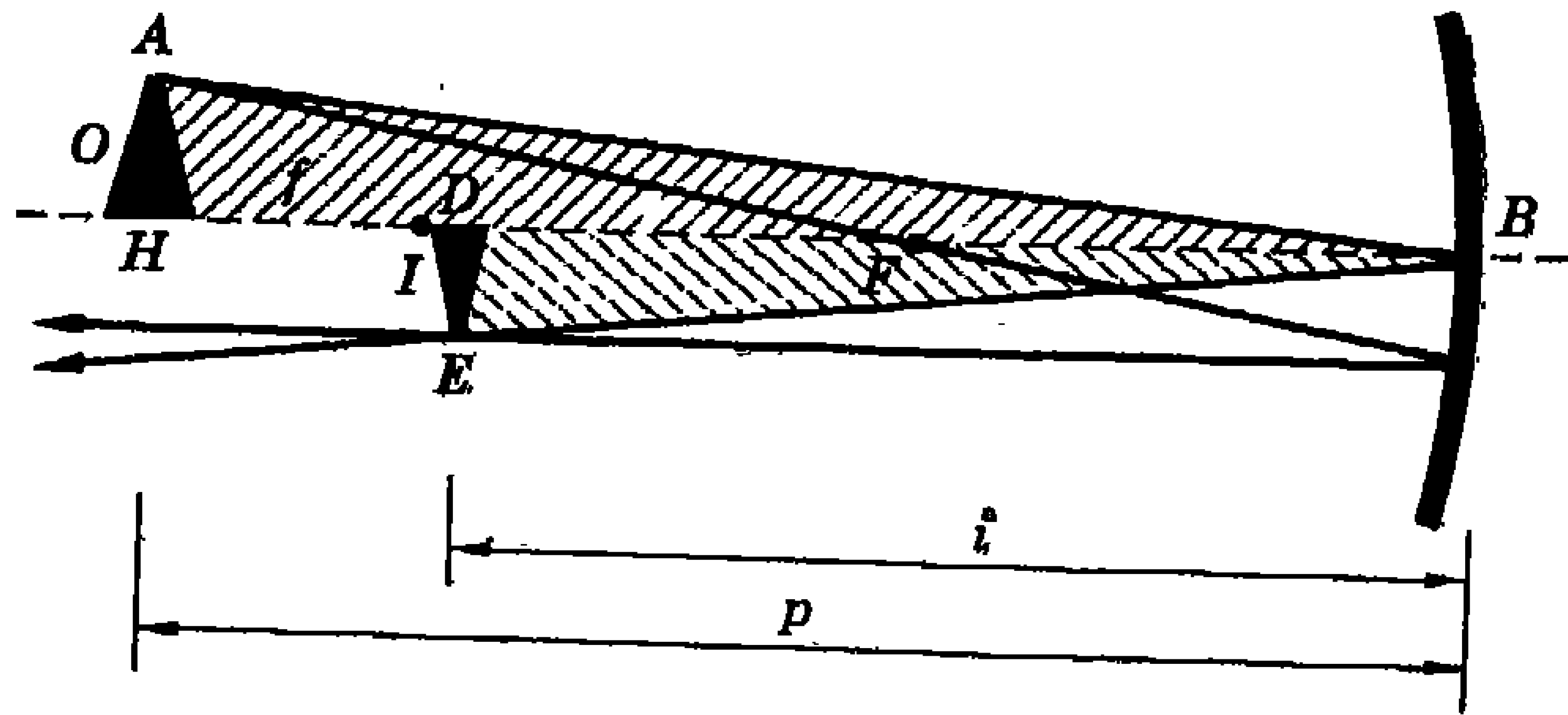
وبمساواة هذا بالمعادلة التى أوجدناها للجزء أ من الشكل نجد أن

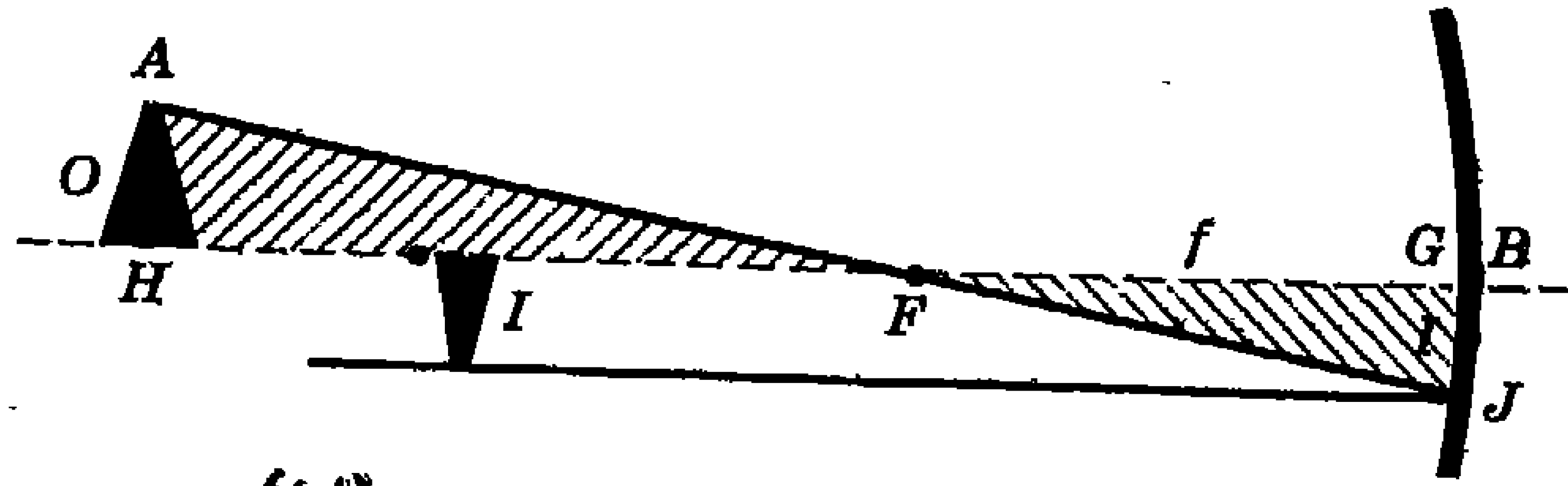
$$\frac{p}{i}=\frac{p-f}{f}$$

بقسمة هذه المعادلة على p واعادة ترتيبها نجد أن :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f} \qquad (٢٣ - ٥) \qquad \text{معادلة المرآة}$$

حيث $f=\frac{1}{2}R$ و R نصف قطر انحناء المرآة .





شكل ٢٣ - ٢١
المثلثان المظللان متشابهان فى كلا الرسمين ، ونفترض أن المسافة $\overline{FG}$ فى الجزء (ب) تختلف اختلافا مهملا عن المسافة $\overline{FB}$.

المعادلة (٢٣ - ٥) هى معادلة المرآة وهى تتيح لنا حساب المسافة i وهى بعد الصورة عن سطح المرآة بشرط أن يكون بعد الجسم عن سطح المرآة p وكذا البعد البؤرى f معروفين . ولحساب الإرتفاع النسبى للجسم وللصورة نشير الى أن $O/I = p/i$ كما أوجدنا من قبل .

ويعرف التكبير الذى تحدثه المرآة على أنه النسبة بين ارتفاع الصورة الى ارتفاع الجسم .

ومن ثم

$$\text{التكبير} = \frac{I}{O} = \frac{i}{p} \qquad (٢٣ - ٦) \qquad \text{تعريف التكبير}$$

مثال توضيحى ٢٣ – ٣ : وضع جسم طوله 2cm على بعد 30 cm من مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 10 cm أوجد موقع وحجم الصورة .

طريقة الحل : تنطبق معادلة المرآة بوضع $p = 30\,\text{cm}$ ، $f = \frac{10}{2} = 5\text{ cm}$ ذلك بأخذ كل الأبعاد بالسنتمترات ،

$$\frac{1}{30} + \frac{1}{i} = \frac{1}{5} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{i} = \frac{6}{30} - \frac{1}{30} = \frac{5}{30}$$

$$i = 6\text{ cm}$$

ستكون الصورة على نفس الجانب الذى يقع فيه الجسم أى على الجانب المفضض ، وحيث أن الضوء سيمر فعلا بالصورة لذا تكون حقيقة ، ويمكن ايجاد حجمها من المعادلة (٢٣ – ٦) ليكون

$$\frac{I}{2} = \frac{6}{30} \quad \text{أو} \quad I = \tfrac{2}{5}\text{ cm high}$$

من الحكمة دائما أن نتحقق من الحل الجبرى برسم المسار الصحيح للأشعة .

مثال توضيحى ٢٣ – ٤ وضع جسم على بعد 5.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤرى 10 cm اوجد موقع الصورة .

طريقة الحل : اذا ما رجعنا الى الشكل ٢٣ – ٢٠ فإننا نرى أن هذا المثال يجب أن يعطينا صورة على الجانب الخطأ من المرآة أى ظهرها غير المفضض ، ويجب أن توضح اجابتنا هذه الحقيقة . باستخدام معادلة المرآة وبأخذ كل الأبعاد بالسنتيمترات فإن

$$\frac{1}{5} + \frac{1}{i} = \frac{1}{10}$$

وتعطى

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{10} - \frac{2}{10} = -\frac{1}{10} \quad \text{or} \quad i = -10\text{ cm}$$

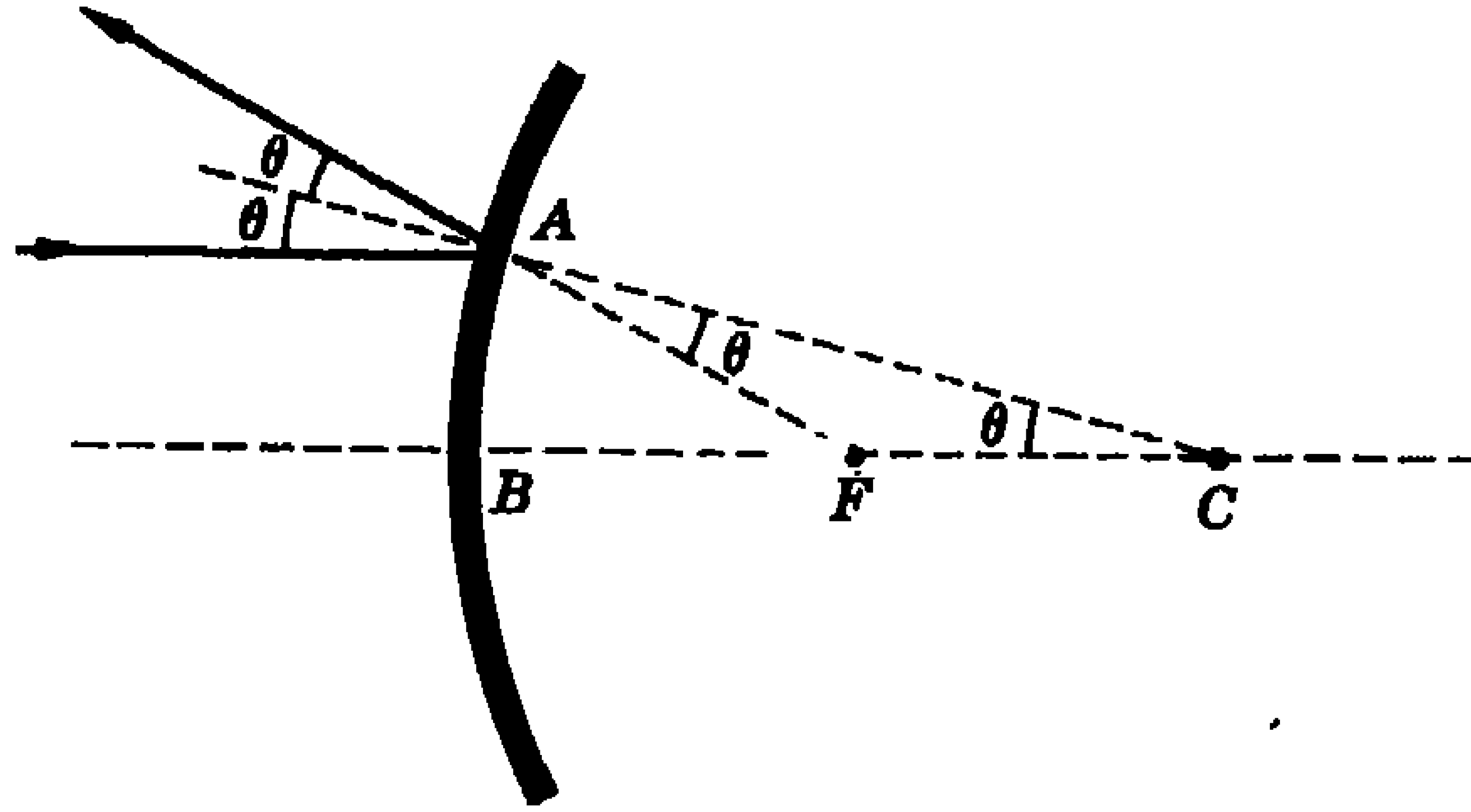
لاحظ أن i سالبة ، أى أنه عندما تكون الصورة خلف المرآة أى عند ظهرها ، فإن بعد الصورة يكون سالبا . وليس هذا بمستغرب فى ضوء حقيقة أن i أخذت موجبة فى الحالة العكسية . من الواضح أن الصورة يجب أن تكون تقديرية فى هذه الحالة ، إذ أنه من الطبيعى أن تكون الصورة المتكونة خلف المرآة تقديرية لأنها لن تظهر على سائر موضوع هناك .

٢٣ – ١٠ المرايا المحدبة

المرآة الكروية المحدبة هى جزء من كرة يطلى سطحها الخارجى بطلاء عاكس وهذا السطح يكون محدبا حين ينظر اليه من خارج الكرة لذا تسمي المرآة محدبة . يوضح الشكل ٢٣ – ٢٢ سلوك الأشعة المتوازية حين تنعكس من على تلك المرآة ، فهى تبدو كما لو كانت متفرقة من نقطة خلف المرآة . وهذه النقطة يطلق عليها اسم **النقطة البؤرية** للمرآة المحدبة . **تنعكس الأشعة المتوزاية الساقطة على مرآة محدبة كما لو كانت آتية من النقطة البؤرية** . ولا ثبات أن الأشعة المتوازية تتصرف بهذه الطريقة سنسلك نفس الطريق الذى اتبعناه مع المرآة المقعرة .

بالرجوع الى الشكل ٢٣ – ٢٢ فإننا نرى من قانون الإنعكاس ومن هندسة الشكل يتضح أن هناك عددا من الزوايا المتساوية كما هو مبين . والمثلث AFC متساوى الساقين أى أن $AF = FC$. أما البعد AB فصغير بالمقارنة مع نصف قطر انحناء المرآة وكذلك AF يساوى تقريبا BF وعليه فإن BF يساوى بالتقريب $\overline{FC}$ أى أنه هنا أيضا يمكن اعتبار البؤرة فى منتصف المسافة بين المراة ومركز انحنائها .

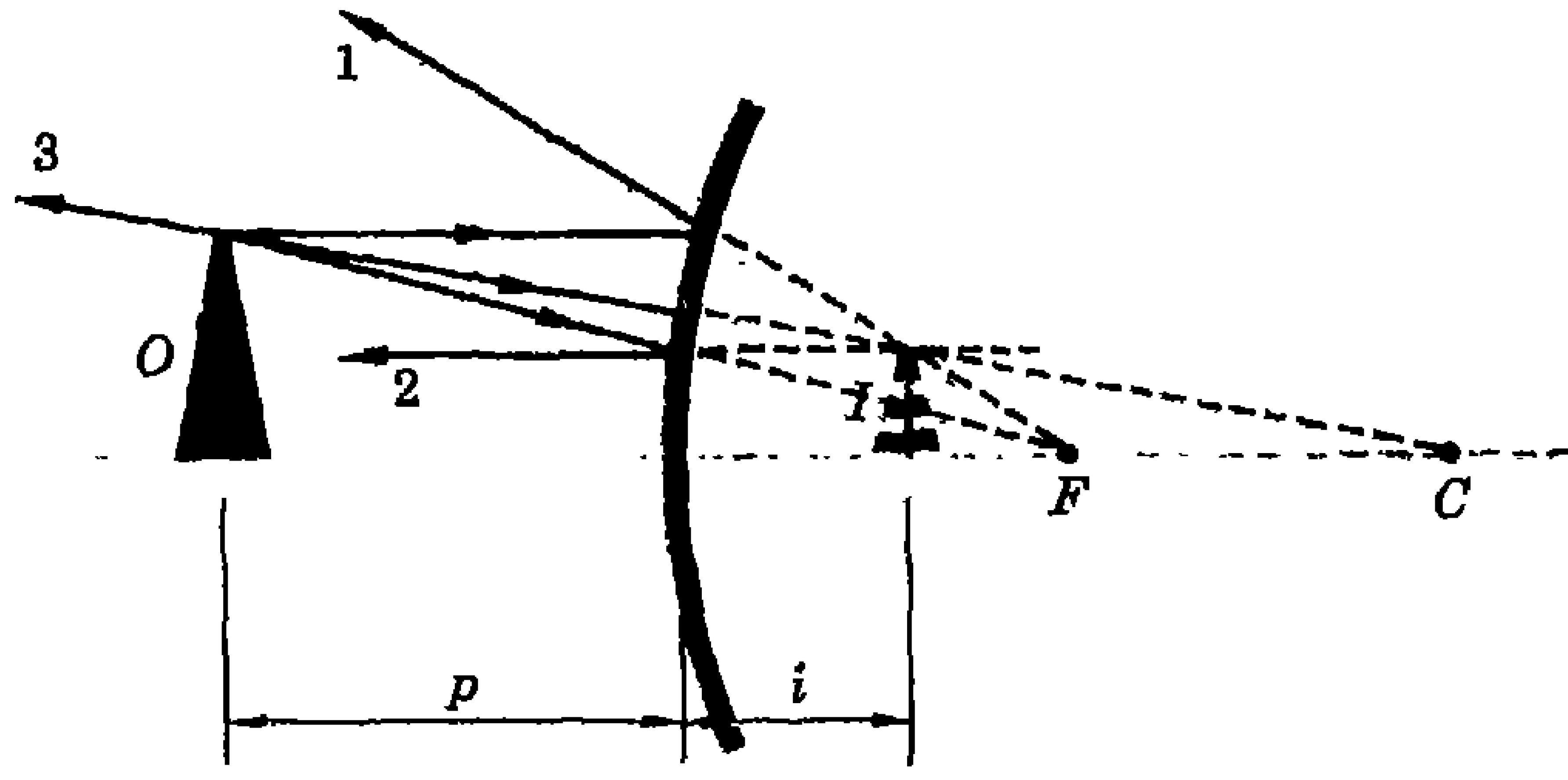
نستطيع اذن أن نكتب القواعد التالية لرسم الأشعة الثلاثة فى حالة المرآة المحدبة



شكل ٢٣ – ٢٢
ينعكس الشعاع الموازى لمحور المرآة كما لو كان قادما من النقطة البؤرية

ينعكس الشعاع الموازى لمحور المرآة كما لو كان قادما من نقطة البؤرة .
ينعكس الشعاع المتجة رأسا نحو نقطة البؤرة موازيا للمحور .
ينعكس الشعاع المتجة رأسا نحو مركز الانحناء مرتدا على أعقابة .

يصور الشكل ٢٣ – ٢٣ هذه الأشعة الثلاثة ، وعليك تتبع كل منها لترى أنها تحقق هذه القواعد . لاحظ أن الأشعة المنعكسة الثلاثة جميعها تبدو قادمة من الصورة I خلف المرآة . وكما ترى فالصورة تقديرية ، معتدلة ومصغرة فى الحجم .



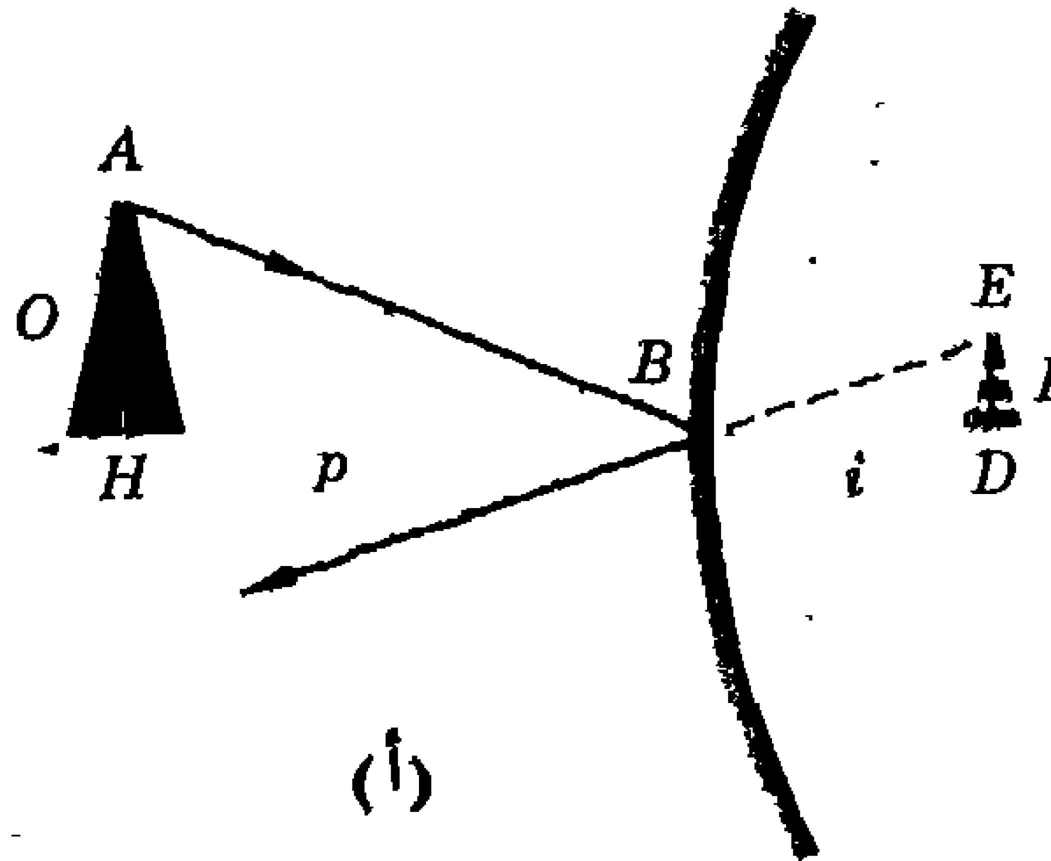
شكل ٢٣ - ٢٣
عليك أن تستطيع رسم الأشعة الثلاثة المبينة وذلك لأى موقف يتضمن مرآة محدبة

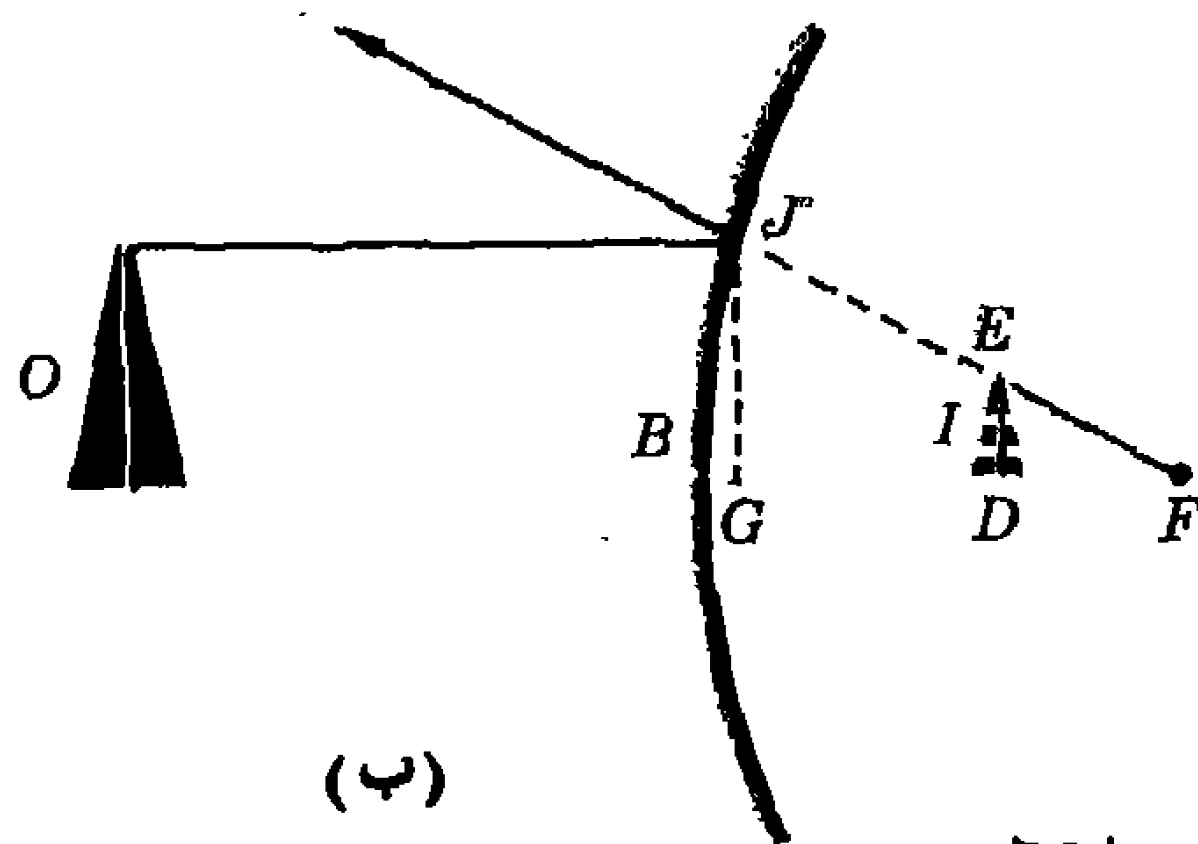
يمكن الحصول على المعادلة الجبرية المستخدمة فى تحديد موقع الصورة فى حالة مرآة محدبة بالرجوع الى الشكل ٢٣ - ٢٤ أ و ب . عليك إثبات أن المثلثين ABH و EBD فى الجزء (أ) متشابهان . وأن المثلثين JFG و EFD فى الجزء (ب) متشابهان . فإذا ما كان هذا صحيحا يمكن إيجاد المعادلات التالية كما فى حالة المرآة المقعرة :

$$\frac{O}{I} = \frac{p}{i} \quad \text{و} \quad \frac{O}{I} = \frac{f}{f-i}$$

وعند كتابة هذه المعادلات اعتبرت المسافة $\overline{BG}$ مهملة من حيث صغرها . بمساواة هاتين المعادلتين وقلبهما ثم القسمة على i وإعادة ترتيب الحدود نجد أن

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{i} = -\frac{1}{f}$$





شكل ٢٣ - ٢٤
المثلثان HBA و DBE متشابهان وكذلك المثلثان DFE GFJ سنفترض أن المسافة $\overline{FG}$ هى بالضرورة مثل $\overline{FB}$.

لاحظ أن هذه المعادلة – بغض النظر عن الاشارات – هى نفسها المعادلة ٢٣ – ٥ للمرآة المقعرة ، وينبهنا اختلاف الاشارات الى حقيقة أن الصورة فى هذه الحالة تقع خلف المرآة بدلا من أمامها كما أن الحد السالب للبعد البؤرى يعتبر نتيجة أن المرآة محدبة وليست مقعرة .

سنقوم الآن بوضع قواعد تسمح لنا باستخدام المعادلة (٢٣ – ٥) حتى فى حالة المرآة المحدبة وذلك بدلا من تذكر معادلتين للمرايا . لو أننا وافقنا على اعتبار بعد الصور التى تتكون خلف المرآة – أى الصور التقديرية – سالبا فإننا نستطيع إلغاء الإشارة السالبة من الحد الذى يحوى فى معادلة المرآة المحدبة . لو أننا علاوة على هذا – قلنا أن البعد البؤرى لمرآة محدبة يكون دائما سالبا فإن الاشارة السالبة الأخرى يمكن الغاؤها أيضا . ومن ثم يمكننا لجميع المرايا كتابة ما يلى :

معادلة المرآة وقواعد الاشارات الخاصة بها (٢٣ – ٥)

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f} \qquad \text{mirrors}$$

حيث اتفقنا على ما يلى :

١ – يكون بعد الجسم موجبا لو كان موضوعا على الجانب العاكس للمرآة وسالبا فى الحالة المضادة .

٢ – يكون بعد الصورة موجبا لو كانت الصورة تقع على الجانب العاكس للمرآة وسالبا فى الحالة المضادة .

٣ – يكون البعد البؤرى موجبا للمرآة المقعرة وسالبا للمحدبة .

يمكننا بالإضافة الى هذا استعمال المعادلة (٢٣ – ٦) لحساب التكبير فى كلتا الحالتين دون استخدام أية اشارات سالبة .

مثال توضيحى ٢٣ – ٥ استعملت مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 100 cm لعكس ضوء صادر من جسم موضوع على مسافة 75 cm أمام المرآة . أوجد موقع الصورة وحجمها النسبى .

طريقة الحل : حيث أن المرآة محدبة $f=-R/2=-50\text{ cm}$ باستخدام معادلة المرآة وأخذ كل الأبعاد بالسينتمترات ، يكون لدينا

$$\frac{1}{75}+\frac{1}{i}=-\frac{1}{50} \quad \text{أو} \quad i=-30\text{ cm}$$

تفيدنا الإشارة السالبة أن الصورة تقع خلف المرآة وأنها – بالطبع – تقديرية . ويكون حجمها منسوبا الى ارتفاع الجسم هو ،

$$\frac{I}{O}=\frac{i}{p}=\frac{30}{75}=0.40$$

من الحكمة التحقق من هذا الحل بيانيا للتأكد من عدم حدوث أخطاء .

٢٣ – ١١ النقط البؤرية لعدسة

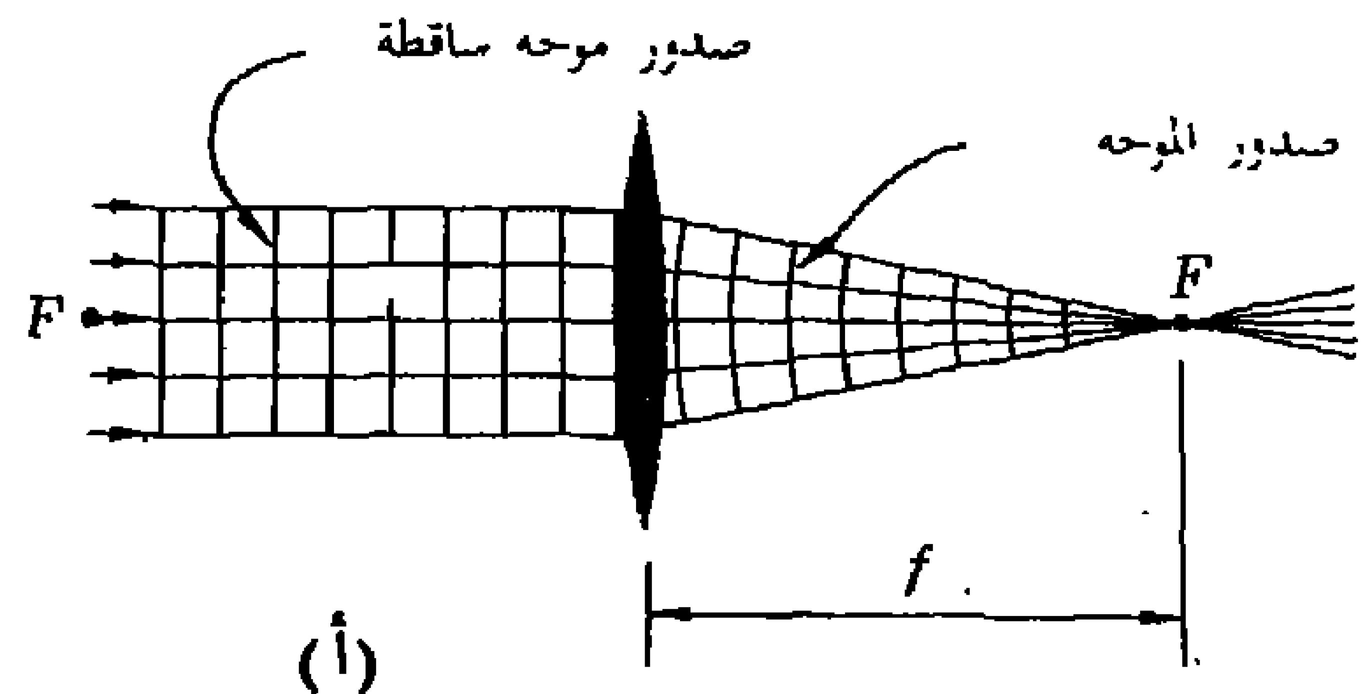
العدسة المصنوعة على الوجه الصحيح تكون قادرة على تركيز حزمة من الضوء المتوازى فى منطقة صغيرة عند النقطة البؤرية . والميكانيكية التى يتم بها هذا مصورة فى الشكل ٢٣ – ٢٥ (أ) و (ب) ونحن نذكر أن موجة الضوء تنتقل بشكل أبطأ خلال الزجاج عنها خلال الهواء وعلى ذلك نجد أن الأجزاء الوسطى من موجة مستوية ساقطة كما فى الشكل ٢٣ – ٢٥ أ ستقع خلف الأجزاء الخارجية للموجة وذلك لأنها انتقلت مسافة اطول داخل الزجاج . وعلى ذلك تكون الموجة الصادرة من العدسة منحنية كما بالشكل . وحيث أن الأشعة أى اتجاه انتقال الضوء تكون عمودية على صدور الموجة لذا فان الضوء يتجمع نحو النقطة F على المحور .

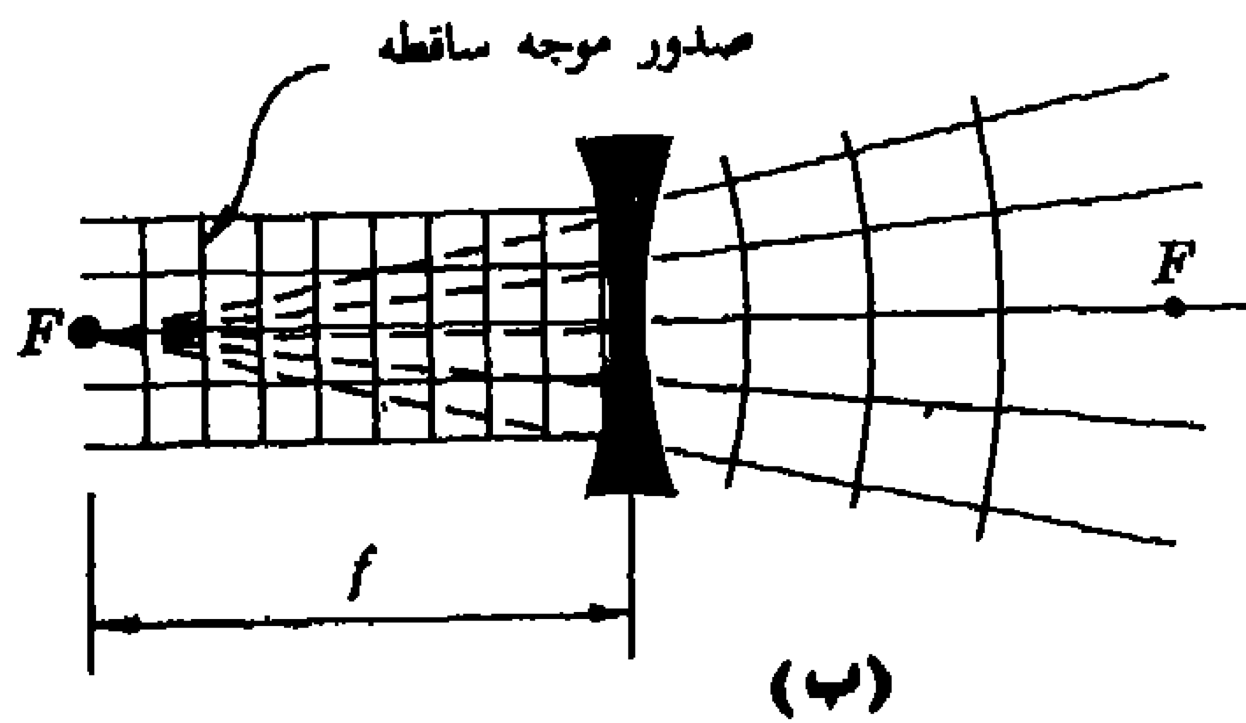
وعلى الرغم من أننا لن نبرهن هنا شيئا إلا أن الأشعة المختلفة سوف تتجمع فى نقطة واحدة ، كما هو مبين ، اذا كانت أسطح العدسة أجزاء من كرات . على أن هذا ليس الا تقريبا ، يصبح تقريبا رديئا اذا أصبح السطح شديد الإنحناء أو بطريقة أخرى لو أن أ لاسطح تكون جزءا كبيرا من كرة . علاوة على ذلك ، فاننا نفترض العدسة رقيقة نسبيا . وفى هذه الظروف تتجمع الأشعة الموازية للمحور تقريبا فى نقطة

تعريف وتسمى النقطة التى تتجمع فيها الأشعة المتوازية بواسطة عدسة مجمعة **النقطة البؤرية للعدسة** .

هناك طريقة بسيطة لتحديد موضع النقطة البؤرية لعدسة كتلك المبينة فى الشكل ٢٣ – ٢٥ أ . لو أن ضوء الشمس مر خلالها فإن صورة للشمس تتكون ولما كانت الشمس بعيدة جدا فإن أمواج الضوء تكون بالضرورة مستوية والأشعة متوازية ومن ثم يكون الموضع الذى تتكون فيه صورة الشمس هو النقطة البؤرية للعدسة .

شكل ٢٣ - ٢٥
تتجمع الأشعة المتوازية بواسطة العدسة المجمعة ، وتتفرق وتبدو كما لو كانت آتية من النقطة البؤرية فى حالة العدسة المفرقة

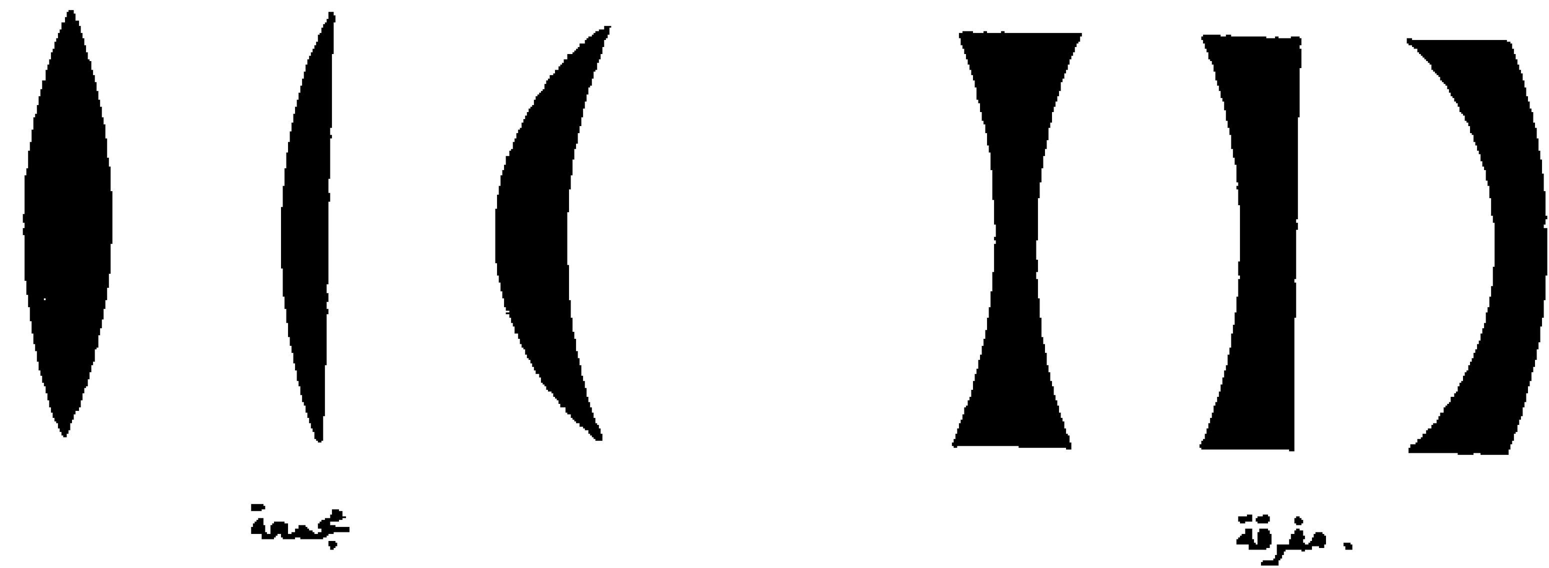




هناك نوع مختلف من العدسات فى شكل ٢٣ – ٢٥ ب . لاحظ أنه لما كانت هذه العدسة أرق فى المنتصف عنها عند الأطراف فإن الاجزاء الخارجية للموجة سوف تقع فى الخلف ، والآن ستكون الموجة الصادرة من العدسة كروية الشكل ولكنها متفرقة . وتحت نفس القيود العامة التى ذكرت من قبل للنوع الآخر من العدسات ، فإن هذه الموجة المتفرقة ستبدو كما لو كانت قادمة من النقطة F فى الشكل . وهذه النقطة التى يبدو الشعاع الاصلى المتوازى على أنه متفرق فيها تسمى **النقطة البؤرية للعدسة المفرقة** .

تعريف

من هنا نرى أن هناك نوعين من العدسات ممكنا : العدسات المجمعة وهى أسمك ما تكون فى المنتصف وتجعل حزمة متوازية من الضوء تتجمع فى النقطة البؤرية ، والعدسات المفرقة وهى أسمك ما تكون عند أطرافها وتجعل – حزمة ضوئية متوازية – تنتشر (أو تتفرق) كما لو كانت صادرة من نقطة هى النقطة البؤرية . وحتى لو أديرت هذه العدسات حول نفسها فإنها ستظل تسلك نفس السلوك* ومن ثم يكون لكل عدسة نقطتان بؤريتان واحدة على كل جانب منها وتقع كلتاهما على نفس البعد عن المركز . وتسمى هذه المسافة من مركز العدسة حتى النقطة البؤرية **البعد البؤرى f للعدسة** ويبين الشكل ٢٣ – ٢٦ عدة أشكال مختلفة لعدسات شائعة . لاحظ أن العدسات المجمعة كلها أسمك ما تكون عند المنتصف .



شكل ٢٣ – ٢٦
العدسات المجمعة أسمك ما تكون عند المنتصف والعكس صحيح بالنسبة للعدسات المفرقة

افترض أن عدسة زجاجية غمرت فى سائل له معامل انكسار مساو لمعامل انكسار الزجاج . فى هذه الحالة ستنتقل الموجة بنفس سرعتها فى الزجاج وفى السائل ولهذا فهى لن تتعرض لأى اضطراب بالمرور خلال العدسة ولن تقوم العدسة بتركيزها فى بؤره . أى أن البعد البؤرى لعدسة ما يعتمد على الوسط الذى توجد فيه ومن الشائع أن يكون هذا الوسط هو الهواء . على أن الأمور ليست هكذا دائما . يعطى البعد البؤرى لعدسة مغمورة فى وسط غير الهواء بالمعادلة ،

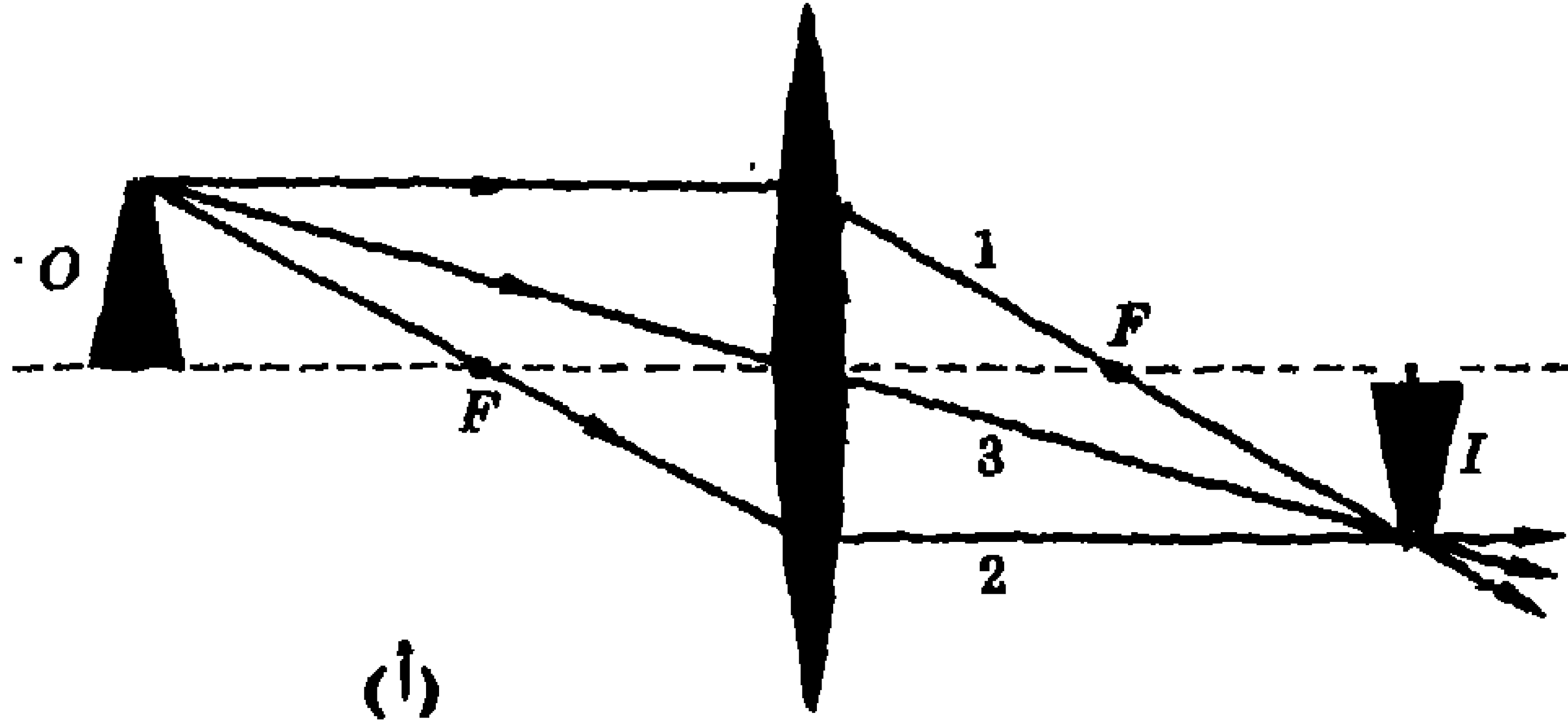
$$f_{\text{medium}} = \frac{f_{\text{air}} n_m (n_g - 1)}{n_g - n_m}$$

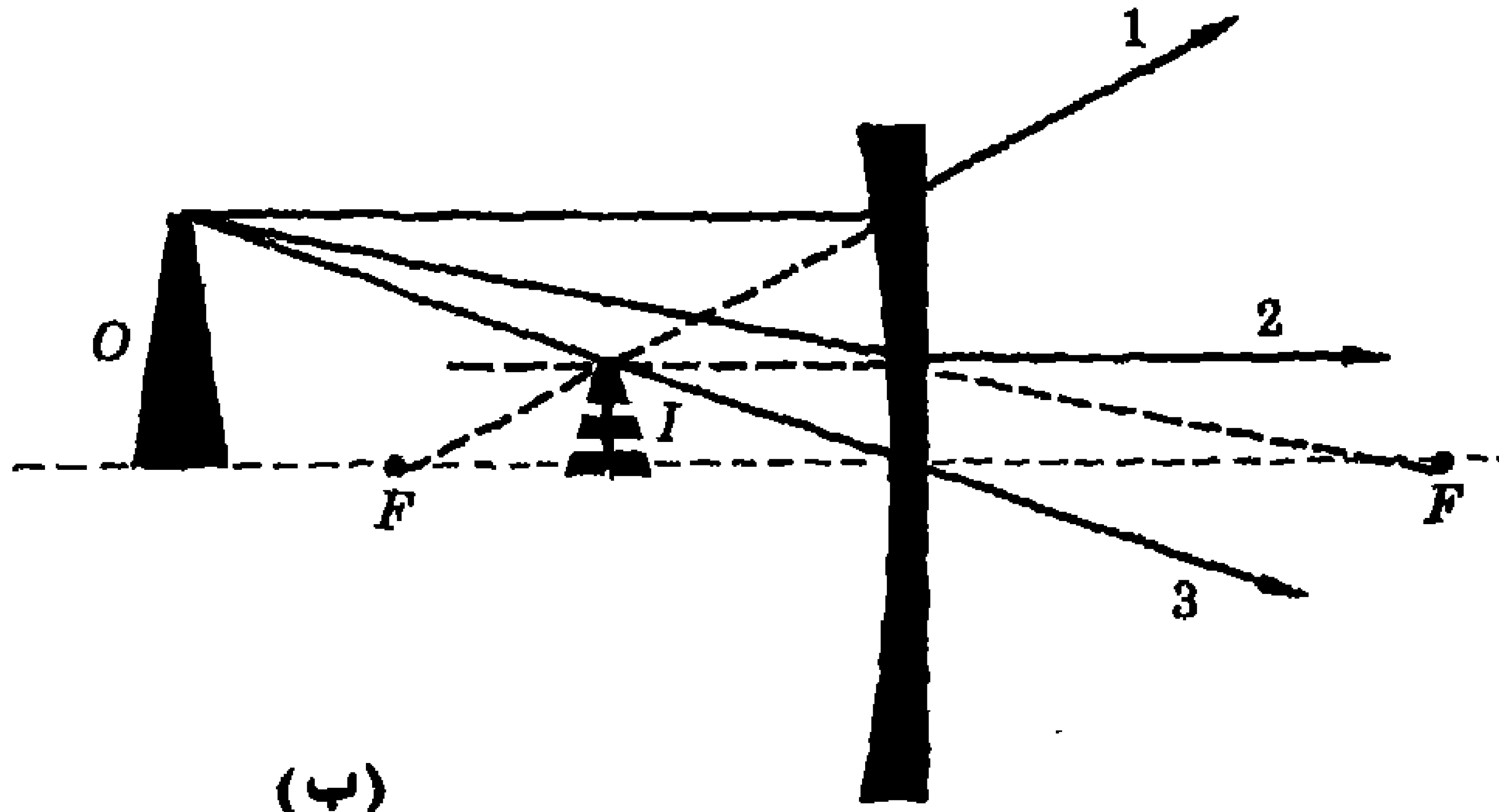
حيث n_m هو معامل انكسار الوسط ، n_g معامل انكسار الزجاج . هل يمكنك إثبات أن هذه العلاقة منطقية للحالات الحدية عندما $n_m \to 1.00,\ n_m \to n_g$ ؟

* حين تكون العدسات سميكة جدا بحيث يتقارب السمك مع البعد البؤرى ، فان هذه العبارة تكون مفيدة .

٢٣ - ١٢ رسم مسار الأشعة للعدسات الرقيقة

رأينا فى القسم السابق أن شعاعا ينتقل موازيا لمحور العدسة سوف ينحنى بواسطة العدسة ، فهو يتجمع نحو البؤرة بواسطة العدسة المجمعة ويتفرق فى البؤرة بالعدسة المفرقة ، وهذه الأشعة مبينة كالشعاع فى شكل ٢٣ - ٢٧ (أ) و (ب)





شكل ٢٣ - ٢٧
الموقع البيانى للصورة المتكونة بواسطة عدسة رقيقة تتكون من رسم الأشعة الثلاثة المبينة

الشعاع الثانى هو عكس الشعاع 1 تماما . (فبالنسبة للعدسة المحدبة يأتى من المصدر مارا بالنقطة البؤرية الأخرى ثم يتجمع موازيا لمحور العدسة . لاحظ أنه مثل الشعاع 1 تماما ولكنه ينتقل فى الإتجاه المضاد . بالنسبة للعدسة المفرقة يتجه الشعاع 2 رأسا الى النقطة البؤرية الأخرى ولكنه لا يصل اليها مطلقا لأن العدسة تفرقة موازيا للمحور كما هو مبين وهو أيضا نفس الشعاع 1 ينتقل فى اتجاه مضاد .

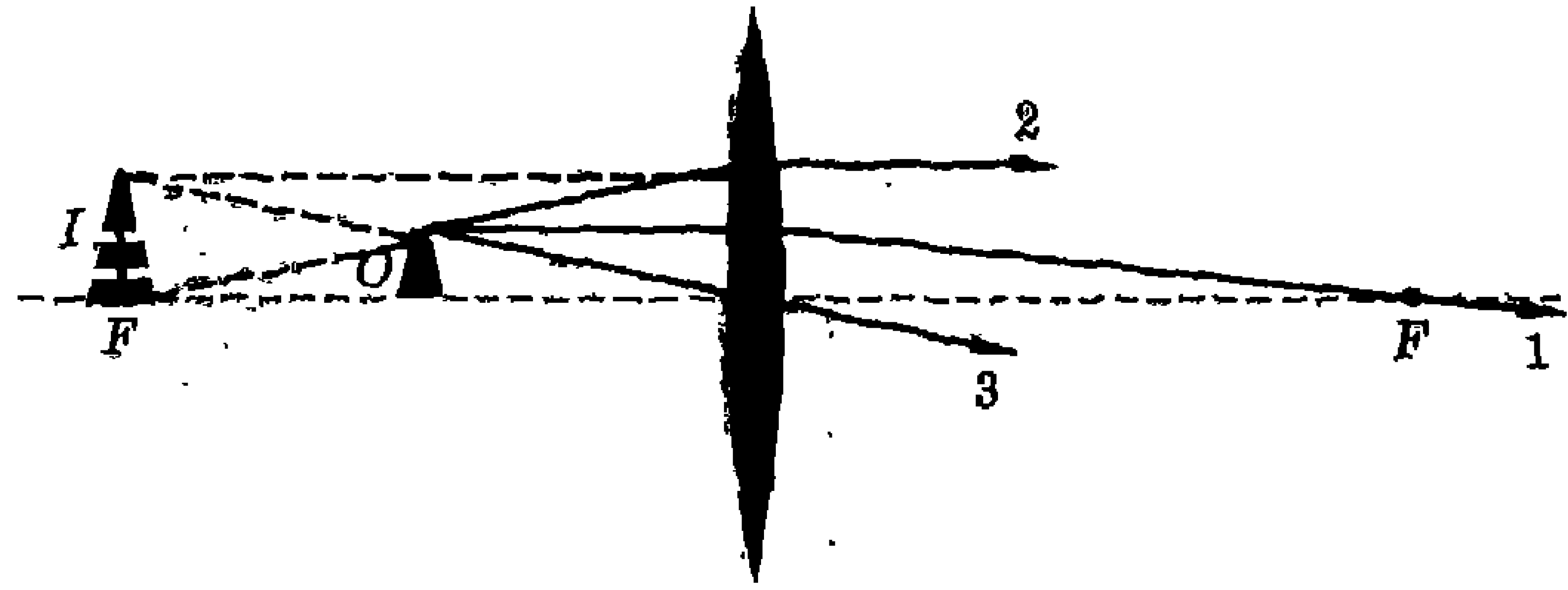
يأتى الشعاع الثالث من المصدر ثم يمضى منستقيما خلال مركز العدسة دون أى انحراف ، ومن السهل ادراك سبب هذا السلوك بالرجوع الى الشكل ٢٣ - ٢٨ ، فأشعة الضوء التى تخترق مركز العدسة تدخل وتخرج من العدسة عند أسطح موازية لبعضها البعض . ومن ثم يسلك الشعاع كما لو كان يمرق خلال لوح مسطح من الزجاج . ولابد أننا نذكر أن الشعاع الضوئى لا ينحرف فى الإتجاه بواسطة لوح مسطح ذى أوجه متوازية لهذا تمضى الأشعة الضوئية المارة خلال العدسة بدون انحراف .



شكل ٢٣ - ٢٨
الشعاع المار خلال مركز العدسة يمر بالضرورة خلال لوح مسطح ولذا لا ينحرف . تحدث ازاحة صغيرة للشعاع ولكنها ليست مبينة بالشكل . لماذا كانت هذه الإزاحة مهملة بالنسبة لعدسة رقيقة ؟

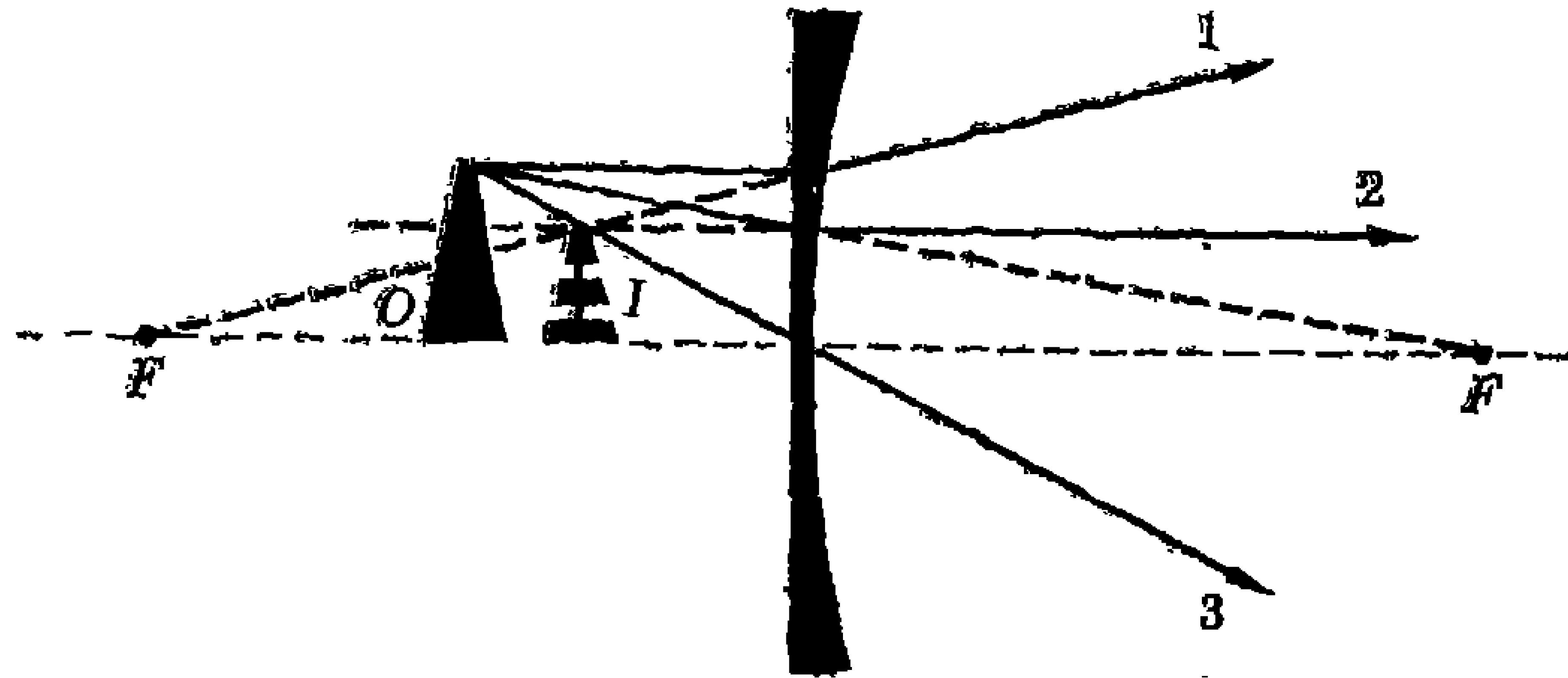
نستطيع الآن أن نرسم ثلاثة من الأشعة الضوئية العديدة التى تمر خلال العدسة ويتيح لنا أى اثنين منهما أن تحدد موقع صورة الجسم . يوضح الشكل ٤٣ – ٢٧ مثالين لهذا التكوين . لاحظ أن الصورة فى جزء أ حقيقية لأن الأشعة الثلاثة تتجمع فعلا عند الصورة واذا وضعنا حائلا هناك لتكونت علية صورة للجسم . أما فى الجزء (ب) فالصورة تقديرية ؛ أو تخيلية لأن الأشعة الثلاثة تبدو فقط كما لو كانت آتية من موضع الصورة وأن حائلا موضوعا فى ذلك الموقع لن تظهر عليه أية صورة لأن الأشعة الثلاثة لا تتقابل فعلا عند ذلك المكان .

مثال توضيحى ٢٣ - ٦ : استخدمت عدسة محدبة بعدها البؤرى 10.0 cm لتكوين صورة لجسم يبعد 5.0 cm أمامها . ارسم مسار الأشعة لتحديد الصورة .
طريقة الحل : يوضح الشكل ٢٣ – ٢٩ المسار الصحيح للأشعة . نلاحظ أن العين ستعتبر أن الأشعة الثلاثة قادمة من الموقع المبين للصورة ، والصورة كما هو مبين تقديرية ، معتدلة ومكبرة .



شكل ٢٣ - ٢٩
تكون صورة تقديرية بواسطة العدسات المحدبة عندما يقع الجسم داخل النقطة البؤرية

مثال توضيحى ٢٣ – ٧ : استخدمت عدسة مقعرة بعدها البؤرى 10.0 cm لتكوين صورة لجسم موضوع أمام العدسة وعلى بعد 5.0 cm منها أوجد موضع الصورة بواسطة رسم مسار الأشعة .
طريقة الحل : يوضح الشكل ٢٣ – ٣٠ رسم مسار الأشعة الصحيح ، حيث تكون الصورة ، أيضا تقديرية وهى معتدلة ومصغرة .



شكل ٢٣ - ٣٠
هل تكون الصورة المتكونة بواسطة عدسة مفرقة دائما تقديرية إذا كان الجسم حقيقى ؟

٢٣ - ١٣ معادلة العدسة الرقيقة

اعتبر الصورة المكونة بواسطة العدسة المجمعة والمبينة فى الشكل ٢٣ - ٣١ (أ) و (ب). المثلثان EBD و ABH فى الجزء (أ) متشابهان وبهذا يمكن أن نكتب

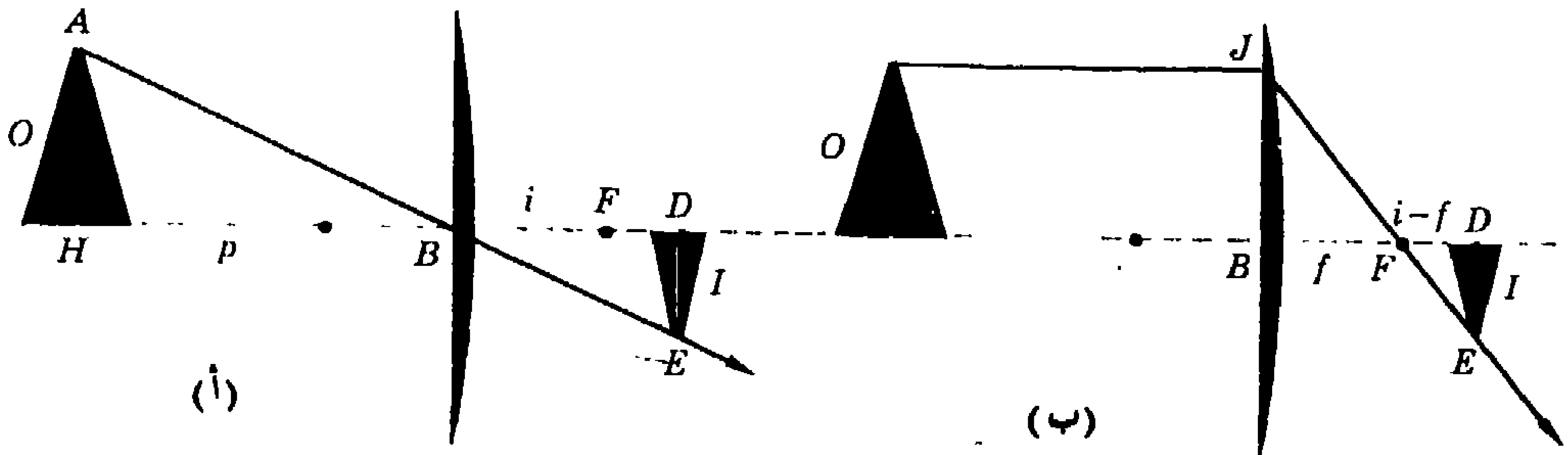
$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$

ولدينا أيضا من تشابه المثلثين EDF و JFB فى الجزء (ب) ما يلى

$$\frac{I}{O} = \frac{i-f}{f}$$

بمساواة هاتين المعادلتين واجراء بعض التبسيط ينتج أن

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \qquad ٢٣ - ٥$$



شكل ٢٣ - ٣١
المثلثـــان EBD و ABH متشابهان تماماً كالمثلثين EDF ، JFB

هذه المعادلة هى نفسها معادلة المرآة (٢٣ - ٥) وقد حصلنا عليها باعتبار p و i موجبين حين يكون كل من الجسم والصورة فى وضعيهما الطبيعيين ، بحيث يكون الجسم فى الجهة التى يأتى منها الضوء وتكون الصورة فى الجانب الذى يتجة اليه الضوء . وتنطبق المعادلة (٢٣ - ٦) ، والخاصة بالتكبير ، على العدسات أيضا وذلك لأن أحدى المعادلات السابقة متطابقه معها .

يمكننا اشتقاق علاقة صالحة للتطبيق على العدسات المقعرة وذلك بالرجوع الى مجموعات المثلثات المتشابهة المبينة فى الشكل ٢٣ - ٣٢ (أ) و (ب) لدينا ،

$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p} \qquad و \qquad \frac{I}{O} = \frac{f-i}{f}$$

بمساواتهما والتبسيط نجد أن :

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{i} = -\frac{1}{f}$$

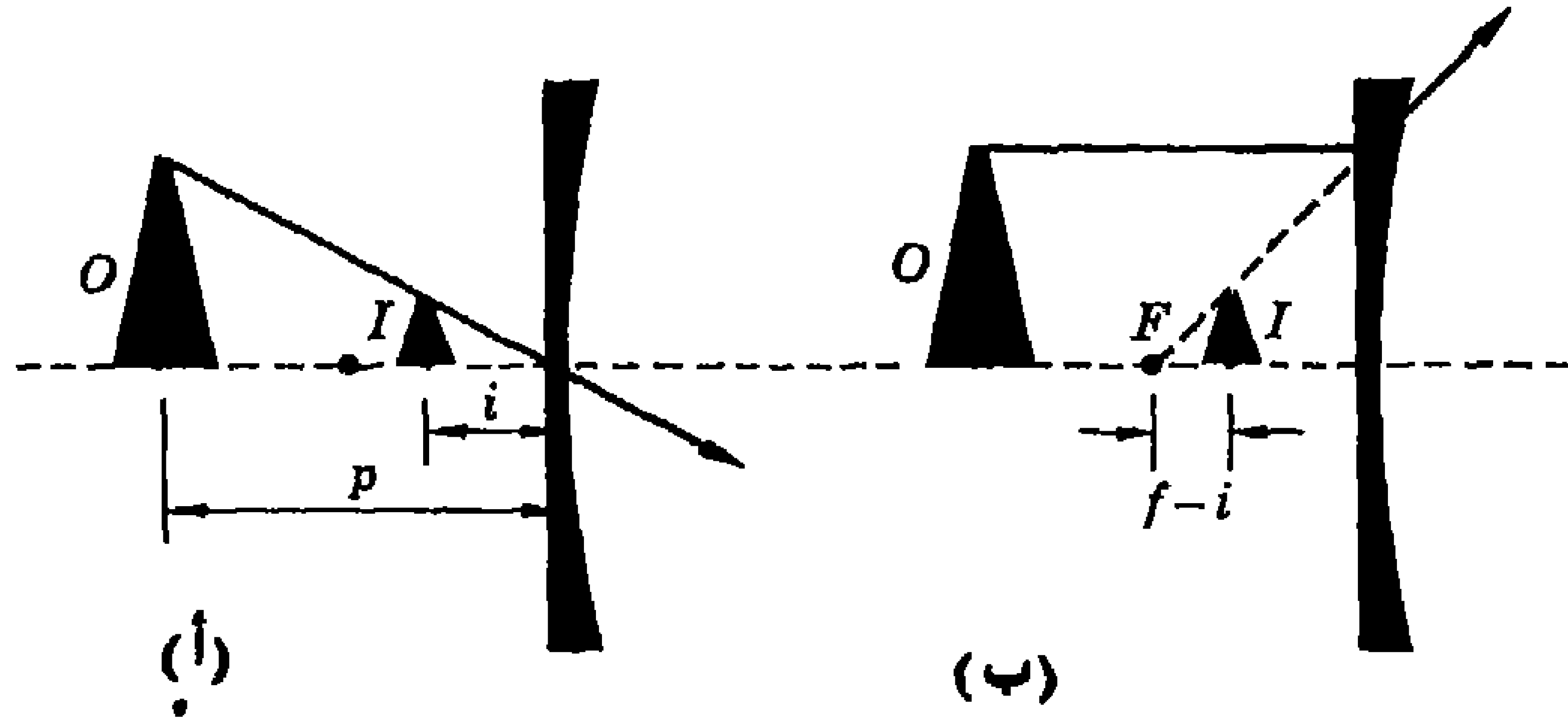
ولكى نجعل هذه العلاقة تبدو مثل المعادلة (٢٣ – ٥) علينا أن نأخذ كلا من i و f سالبين فإذا اتفقنا على أن العدسة المقعرة (المفرقة) لها بعد بؤرى سالب لأمكن إلغاء الإشارة السالبة الموضوعة أمام الحد $1/f$ وعلاوة على ذلك ، لو اتفقنا على جعل بعد الصورة سالبا حين تكون الصورة فى جانب العدسة الذى يأتى منه الضوء فإن الإشارة السالبة أمام الحد $1/i$ يمكن الغاؤها هى الأخرى . وفى هذه الحالة ستنطبق المعادلة (٢٣ – ٥) على جميع العدسات والمرايا .

لاحظ أيضا أن المعادلة (٢٣ – ٦) للتكبير تنطبق على جميع العدسات والمرايا .

لنقم الآن بمراجعة موجزة لقاعدة الإشارات المتبعة عند استخدام المعادلة

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \qquad (٢٣ - ٥)$$

معادلة العدسة وقاعدة الاشارات الخاصة بها



شكل ٢٣ – ٣٢
دراسة المثلثات المتشابهة تؤدى الى معادلة العدسة

١ – يكون بعد الجسم دائما موجبا اذا كان الجسم فى جانب العدسة أو المرآة الذى يأتى منه الضوء .

٢ – يكون بعد الصورة موجبا

أ – فى حالة المرايا إذا كانت الصورة على جانب المرآة الذى يوجد به الضوء ، أى أمام المرآة .

ب – فى حالة العدسات إذا كانت الصورة على جانب العدسة الذى يتجه اليه الضوء النافذ من العدسة .

٣ – يكون البعد البؤرى للمرايا والعدسات المجمعة موجبا ، بينما يكون سالبا للمرايا المحدبة والعدسات المفرقة .

لاحظ أن الوضع الطبيعى أو العادى للجسم والصورة يكون موجبا ، فمن الطبيعى أن يوجد الجسم فى الجانب الذى يأتى منه الضوء أما من ناحية الصورة المتكونة بواسطة عدسة فهى طبيعية عندما تكون فى الجانب الذى يذهب اليه

الضوء . من ناحية أخرى ، تعتبر الصورة فى حالة المرايا طبيعية حين تكون على نفس جانب الجسم لأن الضوء فى هذه الحالة ينعكس ولا ينفذ . من الطبيعى أن تبدو العدسات والمرايا المجمعة أكثر طبيعية بالنسبة لنا عن المرايا والعدسات المفرقة . ومن ثم فالأشياء الطبيعية ستكون لها إشارة موجبة والأخرى سالبة .

وقبل أن نبرح هذا القسم علينا أن نشير الى أن هناك عدة قواعد مختلفة للإشارات وهى تستخدم أحيانا . فالإشارات السالبة كثيرا ما تستخدم فى معادلات العدسات والمرايا . ويبدو أنه لا يوجد اتفاق عام على أى النظم أفضل . فاذا استخدمت معادلة غير التى ذكرت فى هذا القسم فيجب الإلتزام بقواعد الإشارات الخاصة بها ولذا فسنستعمل دائما المعادلة (٢٣ — ٥) والقواعد التى نصصنا عليها بطبيعة الحال .

مثال توضيحى ٢٣ — ٨ : عدسة مفرقة بعدها البؤرى 20 cm تكون صورة لجسم ارتفاعه 3 cm موضوع على بعد 40 cm من العدسة . اوجد وضع وحجم الصورة .

طريقة الحل : من المعادلة (٢٣ — ٥) نجد باستخدام كل الأطوال بالسنتيمترات أن

$$\frac{1}{40}+\frac{1}{i}=-\frac{1}{20} \quad \text{أو} \quad i=-\tfrac{40}{3}\ \text{cm}$$

الصورة تتكون فى الجانب « الخطأ » للعدسة ، أى على نفس الجانب الذى يأتى الضوء منه فهى بالطبع تخيلية كما يمكن التأكد باستعمال رسم مسار الأشعة . لإيجاد حجم الصورة نستعمل المعادلة (٢٣ — ٦) ،

$$\frac{I}{O}=\frac{i}{p} \quad \text{أو} \quad I=\frac{(3)(\frac{40}{3})}{40}=1\ \text{cm}$$

لاحظ أننا لا نتعامل مع الإشارات حين نريد إيجاد حجم الصورة .

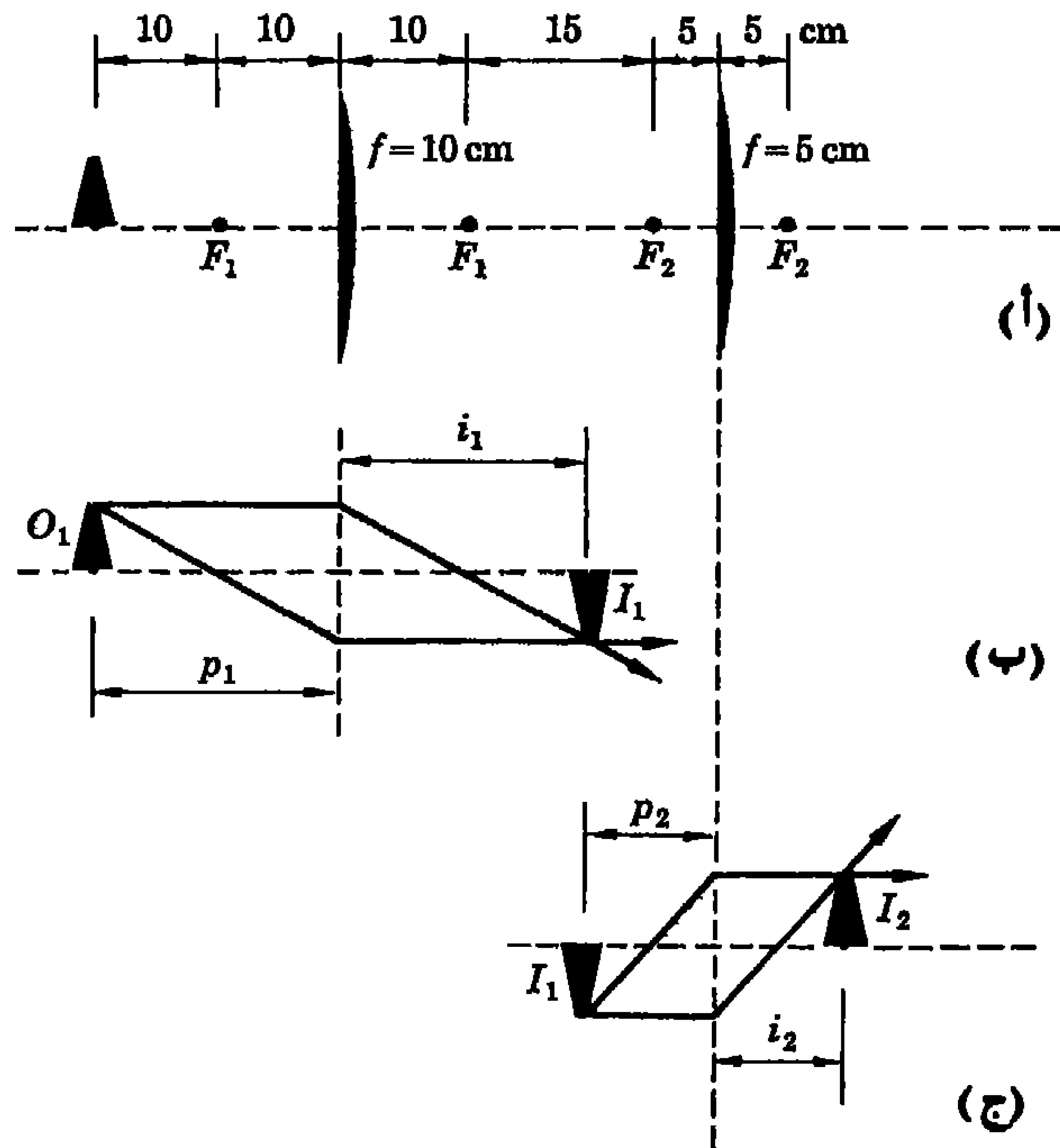
٢٣ — ١٤ مجموعات من العدسات

تحتوى معظم الأجهزة الضوئية على أكثر من عدسة واحدة ، ويسهل تناول هذه الأنظمة اذا خطونا بطريقة منظمة . لنعتبر الآن الصورة النهائية المتكونة بواسطة العدستين والمبينة فى الشكل ٢٣ — ٣٣ . يبعد الجسم 20 cm عن العدسة الأولى التى تبعد بدورها 30 cm عن العدسة الثانية وكلتا العدستان مجمعة . لحل هذه المسألة يرسم مسار الأشعة وكذا بالمعادلات فإننا نبدأ كما فى الشكل ٢٣ — ٣٣ (ب) و (حـ) .

أولا ، تجاهل العدسة الثانية واوجد صورة الجسم الأُصلى كما تكونها العدسة الأُولى ، يحدد رسم مسار الأشعة الصورة I_1 فى الجزء (ب) من الشكل . ويمكننا باستخدام المعادلة أن نجد

$$\frac{1}{20}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{10} \quad \text{أو} \quad i_1 = 20\text{ cm}$$

حيث i_1 كما هو موضح بالشكل .



شكل ٢٣ – ٣٣
لإيجاد الصورة المتكونة بواسطة مجموعة من العدسات فإننا نعتبر كل عدسة على حدة كما فى (ب) و (حـ)

ثم نستخدم الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأُولى كجسم للعدسة الثانية وهذا ممكن لأن العين أو أى جهاز ضوئى موضوع الى يمين الصورة سيرى الصورة كما لو كانت حقا جسما فى ذلك الموضع . والآن بتجاهل العدسة الأُولى تماما واستعمال I_1 كجسم للعدسة الثانية فإننا نرسم مسار الأشعة كما فى الشكل ٢٢ – ٣٣ حـ . وتقع الصورة النهائية عند I_2 أو بالمعادلة :

$$\frac{1}{p_2}+\frac{1}{i_2}=\frac{1}{f_2} \quad \text{و} \quad \frac{1}{30-20}+\frac{1}{i_2}=\frac{1}{5}$$

أو

$$i_2 = 10\text{ cm}$$

حيث i_2 هو كما بالشكل . من الواضح أن الصورة النهائية المتكونة بواسطة العدستين مجتمعتين I_2 ستكون حقيقية ومعتدلة .

لإيجاد حجم الصورة النهائية بدلالة O_1 وارتفاع الجسم ، نطبق المعادلة (٢٣ – ٦) مرتين . فللموقف المبين فى ٢٣ – ٣٣ ب لدينا ،

$$I_1 = O_1 \quad \text{أو} \quad \frac{I_1}{O_1} = \frac{20}{20}$$

والآن باستخدام الشكل ٢٣ – ٣٣ حـ ، وتذكر أن ارتفاع I_1 هو نفسه ارتفاع O_1 وأن I_1 هو فى الواقع الجسم بالنسبة للعدسة الثانية فان ،

$$I_2 = (O_1)(\tfrac{10}{10}) = O_1 \quad \text{أو} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{i_2}{p_2}$$

ومن ثم نجد الموقف غير العادى الذى فيه الصورة بنفس الحجم مثل الجسم الأصلى .

ملخص

يتكون الضوء من أمواج كهرمغناطيسية (ك م) فى المدى المرئى من الأطوال الموجية ، 4×10^{-7} الى 7×10^{-7} cm سرعة الضوء فى الفراغ هى $c = 2.998\times10^{8}$ m/s وينتقل بسرعة أقل من هذه فى الأوساط الأخرى . وتميز المواد ضوئيا بمعامل انكسارها (n) وهو عبارة عن النسبة بين سرعة الضوء فى الفراغ وسرعته فى المادة . بالنسبة للهواء $n = 1.0003$ وللماء $n = 1.33$

عندما ينعكس الضوء من على سطح أملس فإن زاوية السقوط تساوى زاوية الإنعكاس أما حين يمر الضوء من مادة (معامل انكسارها n_1) الى أخرى (معاملها n_2) فإنه ينكسر حسب قانون سنل : $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ إذا كانت $n_2 > n_1$ فإن الشعاع ينحنى نحو العمود ، اما عند ما تكون $n_2 < n_1$ فإن θ_1 تكون أصغر من θ_2 وهذا يؤدى إلى انعكاس كلى داخلى عندما $\theta_2 = 90°$ وتعطى الزاوية الحرجة للإنعكاس الكلى الداخلى بالعلاقة $\sin\theta_c = n_2/n_1$

الصور الحقيقية هى المواقع التى تتركز فيها الأشعة لتكون نسخا ضوئية لجسم ما ويمكن عرض هذه الصور عند وضع حائل فى موقع الصورة . أما الصور التقديرية (أو التخيلية) فهى المواقع التى يبدو فقط أن الضوء قادم منها ، وعند وضع حائل فى ذلك الوقع لاتتكون عليه أية صورة .

تكون المرايا المستوية صورا تقديرية للأجسام الموضوعة أمامها وتكون الصورة خلف المرآة على مسافة تساوى بعد الجسم عن المرآة وتكون الصوره تقديرية ، معتدلة ولها نفس حجم الجسم .

تتجمع الأشعة المتوازية فى النقطة البؤرية بواسطة عدسة أو مرآة مجمعة . وتبدو الأشعة المتوازية متفرقة من النقطة البؤرية حين تنعكس بواسطة مرآة محدبة أو حين تمر خلال عدسة مفرقة . يرتبط بعد الجسم p مع بعد الصورة i والبعد البؤرى f بالعلاقة $1/p + 1/i = 1/f$ وقد عرضت قواعد الإشارات المستخدمة مع هذه العلاقة فى القسم ٢٣ – ١٣ . كما أن نسبة طول الصورة الى طول الجسم (التكبير) قد أعطيت بالعلاقة i/p

يمكن ايجاد صور المرايا والعدسات بالرسم البيانى بواسطة تتبع ثلاثة أشعة ، كما وصفت فى الأقسام ٢٣ – ٨ و ٢٣ – ١٠ للمرايا و ٢٣ – ١٢ للعدسات .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تعطى الحدود التقريبية للأطوال الموجية للطيف المرئى وأن ترتب قائمة بالألوان حسب أطوالها الموجية .

٢ – أن تذكر سرعة الضوء فى الفراغ . أن تحسب n لمادة ما عندما تعطى سرعة الضوء فيها أو العكس .

٣ – أن تشرح لماذا يعطى الجسم البعيد أشعة متوازية وأن تميز بين صدر الموجة والشعاع ، وان تعطى العلاقة بين كل منهما والاخر .

٤ – أن ترسم الشعاع المنعكس عندما تعطى الشعاع الساقط على سطح أملس .

٥ – أن تشرح معنى الإنكسار وأن تستطيع استعمال قانون سنل للشعاع المنكسر .

٦ – أن توضح باستعمال الرسم البيانى كيف يحدث الإنعكاس الكلى الداخلى حيث تكون $n_2 < n_1$ فقط وأن تستخدم قانون سنل لتجد الزاوية الحرجة للإنعكاس الكلى الداخلى . أن تضع قائمة باستخدامات هذه الظاهرة .

٧ – أن تذكر ما إذا كانت صورة معينة تقديرية أو حقيميه

٨ – أن تستخدم رسم مسار الشعاع لكى تحدد موقع الصور لكل من العدسة المنفردة والمرآة المنفردة .

٩ – أن تستخدم معادلة العدسة والمرآة لكى تحصل على p، أو i، و f اذا أعطيت اثنين من الثلاثة أو أعطيت وصفهما . أن تجد العلاقة بين f و R لمرآة ما . أن تذكر اشارة f فى أية حالة .

١٠ – أن تجد حجم صورة ما إذا أعطيت حجم الجسم أو العكس .

١١ – أن تذكر ما إذا كانت عدسة ما مفرقة أم مجمعة فى الهواء حين تعلم شكلها .

١٢ – أن تشرح كيف يمكن عمليا تعيين النقطة البؤرية والبعد البؤرى لمرآة مقعرة وعدسة محدبة .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف وشرح كل من :

الطيف المرئى

$c = 3 \times 10^8$ m/s

معامل الانكسار

صدر الموجة ، الشعاع ، الضوء المتوازى

زاوية السقوط = زاوية الانعكاس

الإنكسار ، قانون سنل

لا يحرف اللوح المتوازى شعاع الضوء

الإنعكاس الكلى الداخلى ، الزاوية الحرجة

الصور التقديرية مقابل الصور الحقيقة

النقطة البؤرية ، البعد البؤرى $f = R/2$

ثلاثة أشعة من أجل تحديد موقع الصورة

معادلة العدسة والمرآة ، قاعدة الاشارات

محدبة ، مقعرة ، مفرقة ، مجمعة

أسئلة وتخمينات

١ – اعتبر مرآة مقعرة وجسما بعيد فى اللانهاية . أين ستتكون الصورة ؟ وهل هى معتدلة أم مقلوبة ، وهل هى أصغر أم أكبر من الجسم ؟ أجب عن هذه الأسئلة حينما يأخذ الجسم فى الإقتراب ببطء نحو المرآة وسجل على وجه الخصوص تلك المواضع التى تتغير عندها احدى الاجابات .

٢ – كرر السؤال الأول لمرآة محدبة .

٣ – كرر السؤال الأول لعدسة مجمعة .

٤ – كرر السؤال الأول لعدسة مفرقة .

٥ – يسمى انعكاس الضوء من على مرآة ملساء **إنعكاسا مرآويا** . (وذلك لأن كلمة **specular** مشتقة من الأصل اللاتينى لكلمة مرآة وحينما يحدث الإنعكاس من على سطح خشن فإنه يسمى **انعكاسا انتشاريا** . صف طبيعة هذا النوع الأخير من الإنعكاس مستخدما الرسم للتوضيح .

٦ – لايبدو الجسم المغمور فى الماء على نفس العمق تحت السطح كما هو فى الواقع حينما ينظر اليه الإنسان من أعلى الماء . اشرح السبب .

٧ – اشرح باستخدام رسم صدر الموجة لماذا تكون العدسة إما مجمعة أو مفرقة اعتمادا على المادة المحيطة بها .

٨ – هل يمكن لكوب زجاجى فارغ أن يركز حزمة ضوئية ، وهل يمكن ذلك فى حالة كوب ملىء بالماء ؟

هل يمكن أن ينشب حريق عن طريق الصدفة نتيجة لوضع إناء زجاجى به ماء فى نافذة مشمسة ؟

٩ – تعمل فقاعة هوائية كروية داخل قطعة من الزجاج عمل عدسة صغيرة . اشرح وهل هى مجمعة أو مفرقة .

١٠ – كيف يمكن تعيين البعد البؤرى لعدسة مجمعة ؟ ولعدسة مفرقة ؟

١١ – كرر السؤال (١٠) للمرايا .

١٢ – وضعت مرآتان مستويتان بحيث كونتا زاوية قائمة ، ثم وضع جسم بينهما . كم عدد الصور المتكونة ؟ كرر المسألة اذا كانت الزاوية بينهما $30°$

١٣ – بكم يزيد زمن استغراق نبضة من الضوء تنتقل من القمر لتصل الأرض بسبب وجود الهواء عما إذا كان الفراغ يغلف الأرض ؟ (ق)

١٤ – يمكن تركيب « فرن شمسى » باستخدام مرآة مقعرة تركز أشعة الشمس فى منطقة صغيرة وهى منطقة الفرن كيف تتوقع لدرجة الحرارة فى الفرن أن تتغير بتغير مساحة المرآة والبعد البؤرى للمرآة (ق)

١٥ – اعتقد نيوتن أن الضوء يتكون من فيض من الجسيمات وأن « جسيمات الضوء » تنجذب بشدة بواسطة سطح الماء عندما ينفذ الضوء من الهواء الى الماء . كيف يمكن أن يؤدى هذا الى تأثير الإنكسار الملاحظ ؟ ولماذا تنفى سرعة الضوء الملاحظة هذه الفكرة ؟

١٦ – فى كثير من متاحف العلوم (وأيضا فى بعض الأماكن غير المتوقعة) توجد غرفة مصممة بحيث أن شخصا يمكنه أن يهمس عند أحد أركانها فيسمع بوضوح فى نقطة معينة بعيدا عنه . كيف يتم تركيب هذه الغرفة حتى يحدث هذا التأثير ؟ (يمكن تركيز أمواج الصوت فى بؤرة تماما مثل أمواج الضوء بالإنعكاس) .

مسائل

١ – تلبس فتاة قرطا فى أذنها اليسرى ، وعندما تنظر فى المرآة المستوية إلى نفسها فإنها ترى قرطا فى أذن صورتها . هل القرط فى الأذن اليمنى أم اليسرى للصورة ؟

٢ – افترض أن طول D فى الشكل ٢٣ – ٣ كان 10 cm ماهما أقل سرعتين ممكنتين لدوران القرص المبين بحيث ينعكس الشعاع بشكل صحيح ؟

٣ – يبلغ معامل انكسار نوع شفاف من البلاستيك 1.48 ما هى سرعة الضوء فى هذا البلاستيك ؟

٤ – يستخدم شعاع الرادار فى تحديد موقع طائرة ما . يبلغ الزمن اللازم لنبضة الرادار لكى تنتقل من جهاز الارسال الى الطائرة والعودة مرة أخرى الى جهاز الإرسال 5.0×10^{-4}s كم تبعد الطائرة ؟

٥ – يلزم لنبضة رادار تنعكس من على سطح القمر 2.6s لكى تقوم برحلة من الأرض الى القمر والعودة مرة أخرى الى الأرض . ما هو بعد القمر ؟

٦ – ما هي المسافة التي يقطعها شعاع ضوئي داخل الماء اذا استغرق زمنا يساوي الزمن الذي يستغرقه في قطع 1 cm في الهواء ؟

٧ – يدخل الضوء بزاوية سقوط 37° الى لوح مسطح من الزجاج ($n = 1.50$) (أ) ما هي زاوية الإنكسار داخل الزجاج ؟ (ب) ماهي الزاوية بين الشعاع الذي يخرج من اللوح والشعاع الساقط على اللوح ؟

٨ – يختلف معامل انكسار الزجاج باختلاف الطول الموجي للضوء . يبلغ معامل انكسار الزجاج التاجي 1.65 للضوء الأزرق ($\lambda = 4300$ Å) ويبلغ 1.615 للضوء الأحمر ($\lambda = 6800$ Å) سقط شعاع ضوئي مكون من هذين اللونين على زجاج تاجي بزاوية سقوط تبلغ 50° اوجد الزوايا الواقعة بين هذين اللونين في الزجاج .

٩ – يسقط شعاع ضوئي بزاوية قدرها 53° على طبقة من الماء تطفو على طبقة من ثاني كبريتيد الكربون اوجد الزاوية التي يصنعها الشعاع في كل سائل .

١٠ – ما هي الزاوية التي يجب أن تنظر بها سمكة من داخل الماء نحو حشرة تقف على الشط عند عند حافة الماء ؟ اعتبر أن السمكة تقف تحت سطح بيحرة ساكنة .

١١ – لو أن شعاعا ضوئيا ينتقل داخل مكعب صلب في مستوى يوزاى قاعدته ، فإنه سيظل في الإنتقال – داخل المكعب الى الابد بشرط أنه يصطدم بكلى سطح بزاوية سقوط قدرها 45° كم يجب أن يكون معامل انكسار المكعب لو ريد للشعاع أن ينعكس كليا داخليا عند كل سطح ؟ (ب) ما هي العقبات العلمية التي قد تظهر في مثل هذه الحالة ؟

١٢ – مرآة مقعرة نصف انحنائها 10 cm تقوم بتكوين صورة لجسم ارتفاعة 2 cm موضوع أمامها وعلى بعد 20 cm منها . اوجد (أ) موضع و (ب) حجم الصورة (حـ) وهل هي حقيقة أم تقديرية ؟ (د) وهل هي معتدلة أم مقلوبة ؟ أعد الحسابات لأجسام على بعد (هـ) 10 (و) 8 و (ز) 4 cm (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .

١٣ – أوجد (أ) موضع ، (ب) حجم ، و (حـ) طبيعة الصورة المتكونة لجسم ارتفاعة 3 cm موضوع على بعد 50 cm امام مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 20 cm . أعد حسابك عندما يكون الجسم على بعد (د) 20 و (هـ) 5 cm (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .

١٤ – اذا وضع جسم على بعد 40 cm أمام مرآة محدبة بعدها البؤرى 10 cm (أ) فأين تتكون الصورة ؟ (ب) وكم يبلغ التكبير ، (حـ) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .

١٥* – تستخدم مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 200 cm لتكوين صورة حقيقية لجسم ما . (أ) اين يجب أن يوضع الجسم حتى يكون بعد الجسم مساوي لبعد الصورة ؟ (ب) هل تكون الصورة متراكبة على الجسم ؟ (حـ) قارن بين حجمى الصورة والجسم (تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة) .

١٦* – (أ) أين يجب وضع الجسم إذا كانت الصورة المتكونة بواسطة مرآة محدبة تبعد عن المرآة نصف المسافة التي يبعدها الجسم ؟ (ب) كم يبلغ التكبير في هذه الحالة ؟

١٧* – أعطيت مرآة مقعرة بعدها البؤرى 20 cm (أ) أين يجب وضع جسم ما بحيث تكون الصورة حقيقية ويبلغ حجمها ضعف حجم الجسم ؟ (ب) أعد الحسابات اذا كانت الصورة تقديرية .

١٨* – تكونت صورة تقديرية بواسطة مرآة محدبة بعدها البؤرى 10 cm (أ) أين يجب وضع الجسم اذا كانت الصورة تبلغ نصف حجم الجسم ؟ (ب) هل يمكن – لمثل هذا النوع من الأجسام – الحصول على صورة تقديرية أكبر من الجسم ؟

١٩ – استخدمت عدسة محدبة بعدها البؤرى 20 cm لتكوين صورة لجسم ارتفاعة 3 cm أوجد موضع ، حجم وطبيعة الصورة عند الأبعاد التالية للجسم :

(أ) 100 cm ، (ب) 40 cm ، (حـ) 10 cm

٢٠ – اوجد موضع وحجم وطبيعة الصورة المتكونة بواسطة عدسة مفرقة بعدها البؤرى 30 cm- إذا وضع جسم ارتفاعة 5 cm على الأبعاد التالية (أ) 90 cm (ب) 60 cm ، (حـ) 20 cm

٢١* – (أ) أين يجب وضع جسم بالنسبة لعدسة مجمعة اذا كانت الصورة لها نفس الحجم مثل الجسم ؟

(ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ عبر عن اجابتك بدلالة f .

٢٢** - اذا استخدمت عدسة مفرقة لتكوين صورة يبلغ حجمها نصف حجم الجسم فأين يجب وضع الجسم ؟
٢٣* - عدستان مجمعتان منطبقتان $f = 30$ cm والمسافة بينهما 90 cm (أ) اوجد البعد النهائى لصورة جسم موضوع على مسافة 120 cmأمام العدسة الأولى . (ب) كم يبلغ تكبير المجموعة ؟
٢٤* - وضع جسم على بعدة 12 cm أمام عدسة مجمعة ($f = 8$cm) . هناك عدسة مفرقة $f =$ -6cm على مسافة 36 cm بعد العدسة الأولى . (أ) اوجد موضع وتكبير الصورة النهائية . (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ (حـ) وهل هى معتدلة أم مقلوبة ؟
٢٥* - عدستان الأولى مجمعة وبعدها البؤرى 20 cm والأخرى مفرقة $f =$ -30 cm بفصل بينهما مسافة 30 cm . إذا وضع جسم على بعد 10 cm أمام العدسة الأولى فأوجد (أ) موضع الصورة (ب) التكبير .
٢٦** - وضع جسم على بعد 40 cm امام عدسة مجمعة $f = 20$ cm وهى بدورها موضوعة أمام مرآة مستوية وعلى بعد 50 cm أوجد جميع الصور المتكونة بواسطة هذه المجموعة .
٢٧* - وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 8 cm على بعد 16 cm الى يسار مرآة كروية مقعرة نصف قطرها 20 cm . اذا وضع جسم ما على بعد 8 cm الى يسار العدسة ، فاوجد كل الصور المتكونة بواسطة هذه المجموعة .
٢٨ - عدسة من الزجاج التاجى بعدها البؤرى 20 cm موضوعة فى الهواء . كم يبلغ بعدها البؤرى حين تغمر فى الماء ؟ .

الفصل الرابع والعشرون

النبيطات الضوئية

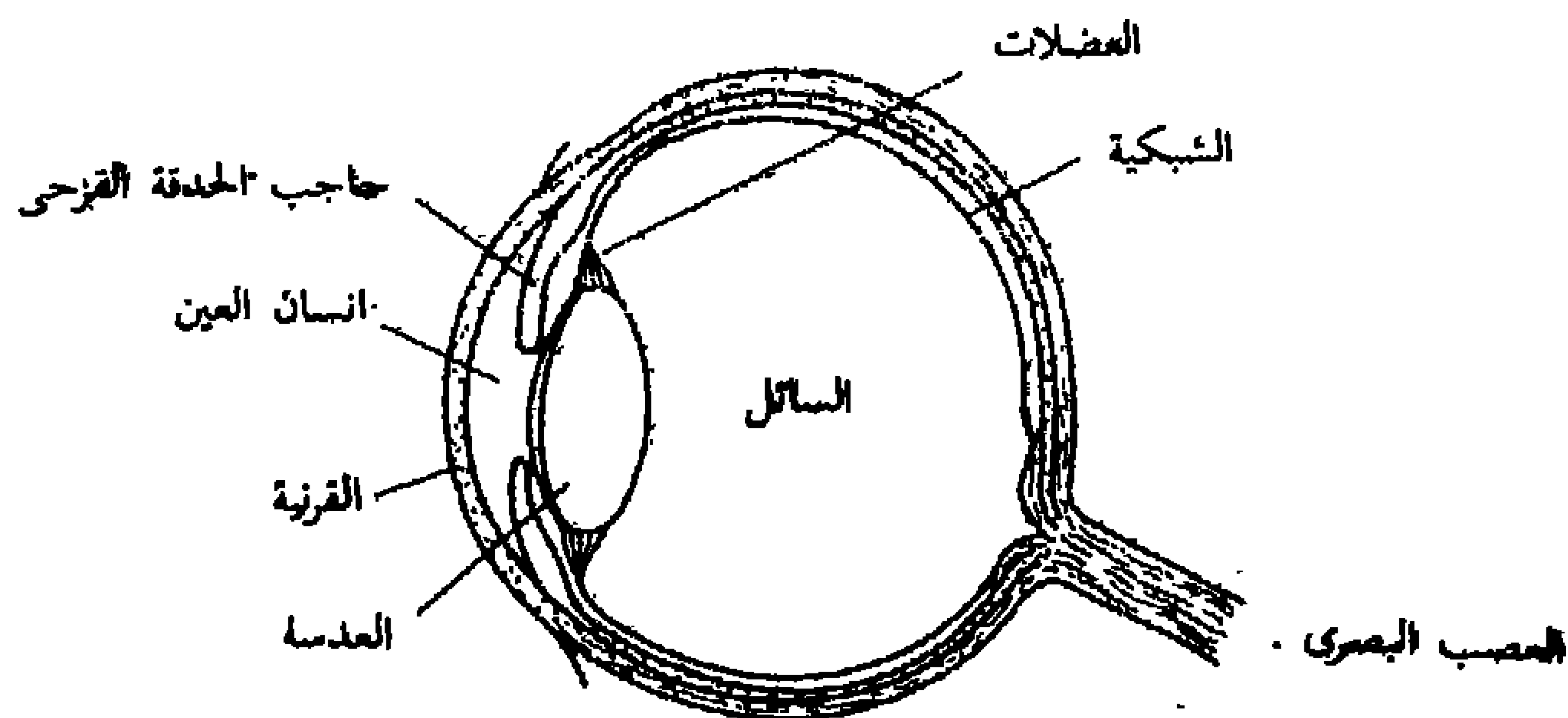
الآن وقد فهمنا العدسات والمرايا فإننا نستطيع دراسة بعض النبيطات الضوئية الشائعة . وسنناقش عمل فئة شاسعة من النبيطات مثل العين البشرية والتلسكوب (المقراب) وكذلك الميكرسكوب (المجهر) وأجهزة أخرى ذات أهمية فى حياتنا . وبهذه الطريقة لن نحصل فقط على تدريب على استخدام العدسات والمرايا بل إننا سنصبح أيضا فنيين مهرة فى تشغيل تلك النبيطات الضوئية التى كثيرا ما تدعو الحاجة الى استخدامها .

٢٤ - ١ العين

ان أكثر النبيطات الضوئية شيوعا ، وهي العين ، هي في الوقت نفسه أكثرها تعقيدا ، فعلى الرغم من أن نظام العدسات الفعلى فيها ليس معقدا جدا إلا أن جهاز الإستيعاب المصاحب لها معقد تعقيد الإنسان نفسه ، ولازالت الطريقة الدقيقة التى يتم بها تقل الصورة المتكونة على الشبكية فى العين الى احساسنا بالرؤية — تشكل تحديا لعلماء الفيزياء الحيوية . وسيكون من الضرورى بالنسبة لنا أن تقصر مناقشاتنا على نظام العدسات وتكوين الصورة على شبكية العين .

يوضح الشكل ٢٤ — ١ رسما مبسطا للعين — ولعلك تعرف فعلا أن القرنية هى غطاء واق للعين ، وأن حاجب الحدقة القزحى يتحكم فى كمية الضوء الداخلة . أما الشبكية فهى السطح الحساس الذى ينقل الصورة المتكونة عليه الى المخ . عندما يدخل شعاع ضوئى الى العين فإنه ينكسر عند القرنية . ويحدث انكسار أقل فى انسان العين والعدسة وذلك لأن معاملات انكسار القرنية ، وإنسان العين والعدسة وكذا الأجزاء السائلة من العين كلها متساوية .

تكون كل هذه التأثيرات الإنكسارية صورة الأجسام البعيدة على شبكية العين المسترخية العادية ، ومن ثم فالبعد البؤرى للعين هو تقريبا المسافة بين الشبكية والعدسة . فإذا رسمنا مسار الأشعة لعدسة محدبة فسنجد أن بعد الصورة يزيد كلما اقترب الجسم من العدسة . أما فى العين فإن بعد الصورة يجب أن يظل دائما بحيث تتكون الصورة عند الشبكية . ويتحقق هذا فقط اذا ما صارت عدسة العين أكثر تجميعا كلما اقترب الجسم المرئى من العين . تقوم عضلات العين بتغيير شكل عدسة العين القابلة للتشكيل بحيث تجعل سمكها أكبر (تجمع أكثر) عند رؤية أجسام قريبة من العين .



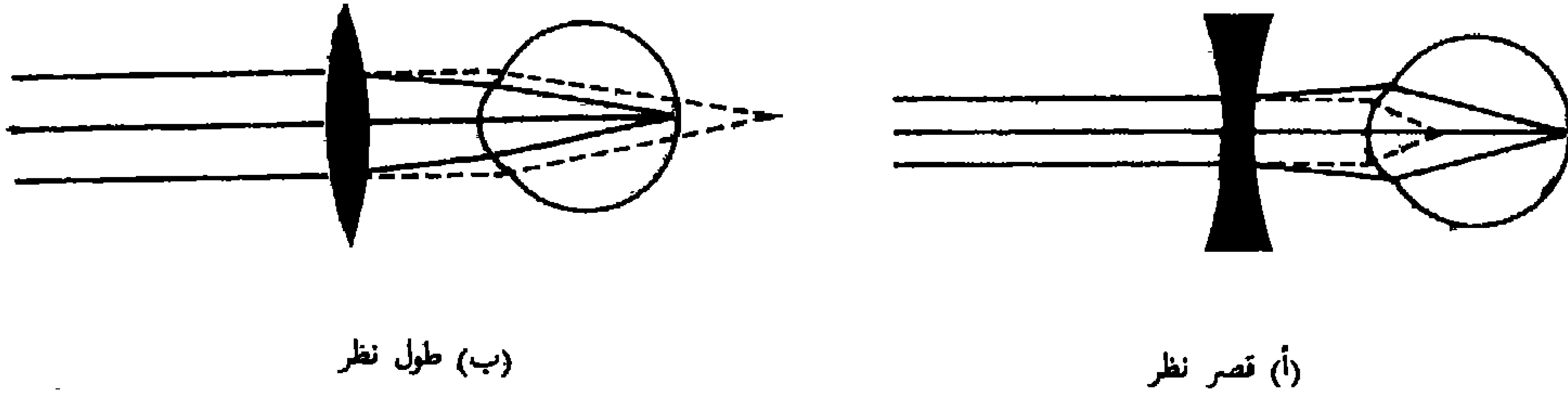
٢٤ - ١
رسم العين البشرية

من الطبيعى أن يستطيع الإنسان إرخاء عدسة العين الى الحالة التى يمكن معها تركيز صورة جسم بعيد فى بؤرة على الشبكية فإن لم يستطع يقال أنه يشكو من — **قصر النظر** — تستطيع العين قصيرة النظر أن تركز الصورة فى بؤرة فقط عندما يكون الجسم على مسافة أقل من قيمة معينة وتسمى هذه المسافة **النقطة البعيدة** للعين. ولما كانت العين تظل مجمعة أكثر من اللازم بحيث لا تسمح بالتركيز الصحيح لكل جسم بعيد ، لذا يجب أن يلبس قصير النظر نظارة ذات عدسات مفرقة حتى يرى الأجسام البعيده بوضوح . وقد صورنا هذا الموقف فى الشكل ٢٤ — ٢ أ حيث تشير الخطوط المتقطعة الى الموضع الذى تتركز فيه صور الأجسام البعيدة بدون استخدام النظارة .

قصر النظر

شكل ٢٤ — ٢

تستخدم عدسة مفرقة لتصحيح قصر النظر بينما تستخدم عدسة مجمعة لتصحيح طول النظر والأشكال هنا مبالغ فيها



(ب) طول نظر

(أ) قصر نظر

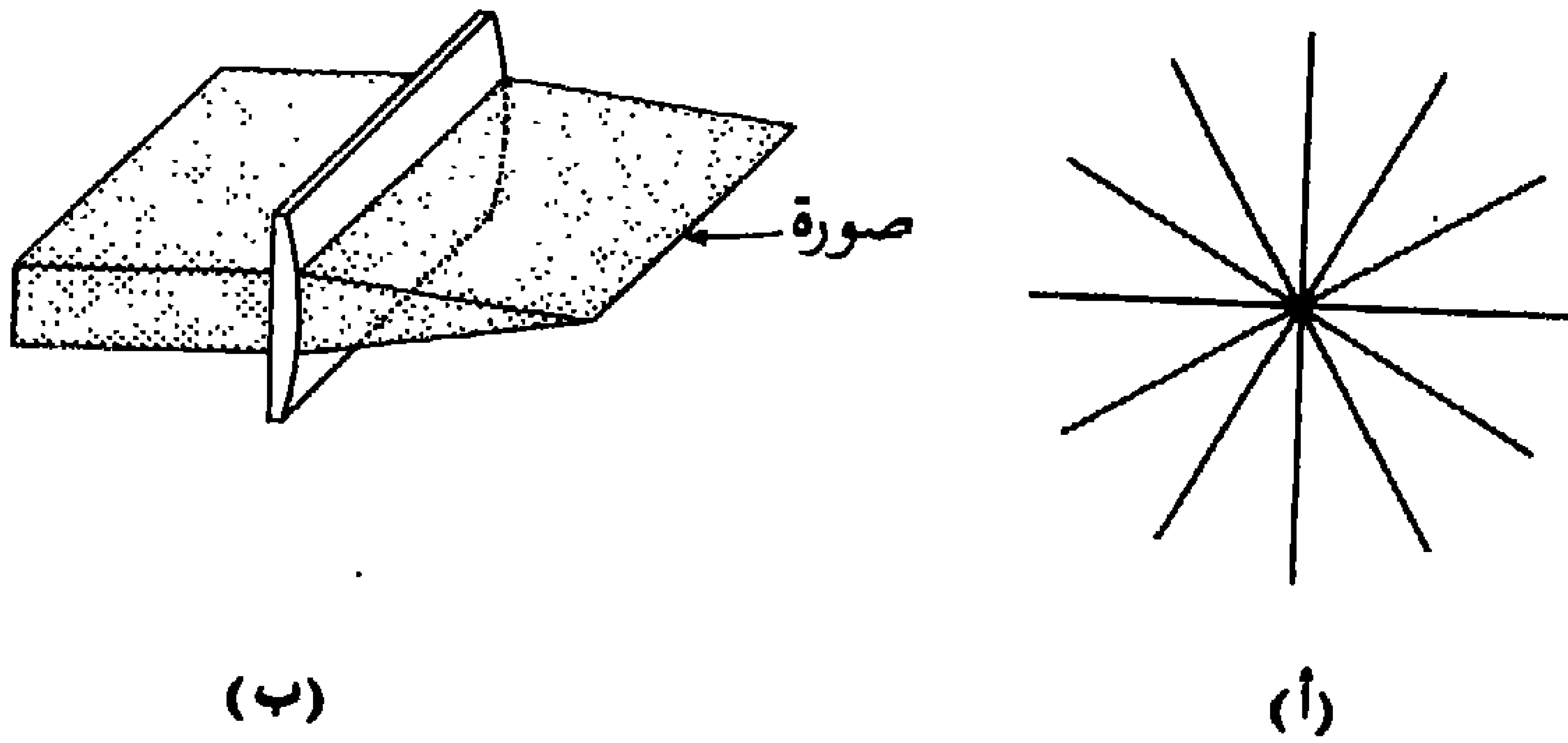
أما الأشخاص الذين لديهم **طول نظر** فيستطيعون ارخاء أعينهم لترى الاجسام البعيدة ولكنهم لا يستطيعون جعل أعينهم سميكة بدرجة كافية حتى تركز صور الأجسام القريبه على الشبكية . والإنسان الطبيعى لا يستطيع جعل العدسة مجمعة بدرجة كافية حتى ترى أجساما أقرب من حوالى 25 cm وهى المسافة التى تسمى **النقطة القريبة** العادية للعين . يجب على طويل النظر أن يرتدى نظارة ذات عدسات مجمعة تساعد العين على جعل الأجسام تتركز صورها على الشبكية . وقد صور هذا الموقف فى الشكل ٢٤ — ٢ ب

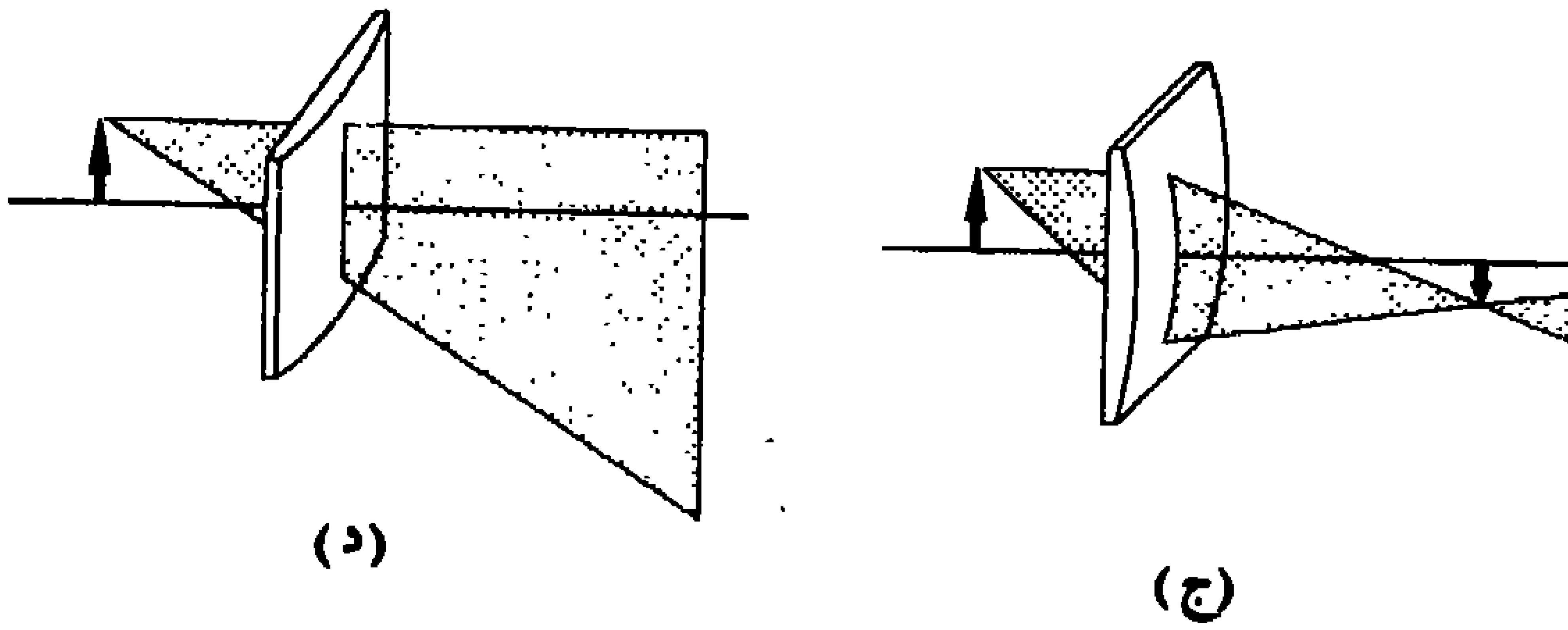
طول النظر

لو كان للعين قابلية ضئيلة لتغيير شكل العدسة ، يقال أن هذه العين قد فقدت **التكيف**. وقد لا تستطيع مثل هذه العين أن تركز على الجسم البعيد جدا ولا على الجسم القريب جدا . ويتيح استخدام العدسات ثنائية البؤرة فى النظارات أن ينظر الشخص خلال العدسة المفرقة حين ينظر الى الأمام وأن ينظر خلال المجمعة حين ينظر الى أسفل . وقد يكون لدى بعض الناس ثلاثة أنواع من العدسات مثبتة فى نظارة واحدة .

اللااستجمية

وأحد أنماط العيوب الشائعة للعين هو **اللااستجمية** . حين ينظر إنسان بعينه مثل هذا العيب نحو منظر الإختبار المبين فى الشكل ٢٤ – ٣ أ فان بعض الخطوط تبدو أكثر قتامة من الأخرى ويرجع هذا الى الشكل غير الكروى لعدسة العين.فكما تعلم تقوم العدسة الكروية بتركيز الأشعة المتوازية فى نقطة واحدة هى النقطة البؤرية . أما عدسة العين التى شوه شكلها فتعمل عادة كعدسة كروية مع عدسة اسطوانية متراكبة عليها . ويمكن مشاهدة تأثير العدسة الأسطوانية بفحص الشكل ٢٤ – ٣ (ب) ، (حـ) ، (د) .





شكل ٢٤ – ٣
تكون العدسات الأسطوانية صورا خطية بدلا من النقطية وتتركز الخطوط الموجودة فى مستويات مختلفة بطريقة مختلفة كما هو مبين فى (حـ) و (د)

لاحظ فى الجزء (ب) أن العدسة الأسطوانية تركز الأشعة المتوازية فى خط بدلا من نقطة . والأشعة الواقعة فى مستوى عمودى على محور الأسطوانة كما فى (جـ) تتركز فى نقطة ، أما الأشعة التى تقع فى مستوى يوازى محور الأسطوانة فلا تتركز على الإطلاق كما فى (د) . ونتيجة لهذا فإن عدسة العين تركز الخطوط المبينة فى الجزء (أ) فى مواضع مختلفة ، فعندما يكون خط رأسى فى البؤرة الصحيحة فإن الخط الأفقى ، مثلا ، ربما لا يكون فى البؤرة ، وتبعا لهذا فان الخطوط المتجهة بزوايا مختلفة ستبدو مختلفة لشخص مصاب بهذا العيب . ولمعالجة هذا يجب استعمال نظارة تلاشى بالضبط تأثير عدسة العين الأسطوانية .

مثال توضيحى ٢٤ - ١ : يستطيع شخص ذو طول نظر أن يقرأ الجريدة حين يمسك بها على بعد 75 cm على الأقل من عينيه . ما هو البعد البؤرى لعدسات نظارة القراءة اللازمة لهذا الشخص ؟ .

طريقة الحل : يراد لهذا الشخص أن يرى الحروف المطبوعة واضحة حين تكون الجريدة على بعد 25 cm من عينية ، أى عند النقطة القريبة الطبيعية . ومن ثم تلزم عدسة تعطى صورة تقديرية عند $i = -75$ حينما يكون الجسم الحقيقى عند مسافة قدرها $p = 25$ cm باستخدام معادلة العدسة ،

$$\frac{1}{25} + \frac{1}{-75} = \frac{1}{f}$$

ومنها

$$f = 37.5 \text{ cm}$$

لاحظ أن العدسة المطلوبة هنا عدسة مجمعة

مثال توضيحى ٢٤ - ٢ ما هو البعد البؤرى لعدسة تصحيحية لسيدة نقطتها البعيدة 50 cm

طريقة الحل . يجب على العدسة التصحيحية أن تكون صورة لجسم بعيد بحيث تكون الصورة تقديرية وتبعد 50 cm عن العين . وعلى هذا $i = -50$ cm و $p \rightarrow \infty$ وعلى ذلك تكون معادلة العدسة هى :

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{-50} = \frac{1}{f}$$

ومنها

$$f = -50 \text{ cm}$$

لاحظ أن العدسة المطلوبة هنا عدسة مفرقة .

٢٤ - ٢ آلة التصوير (الكاميرا) البسيطة

تعمل آلة التصوير كالعين البشرية ، فهى تستخدم عدسة لإنتاج صورة لجسم ما على فيلم . والفيلم هنا يقوم بعمل الشبكية فى العين . والرسم التخطيطى فى الشكل ٢٤ - ٤ يبين آلة تصوير بسيطة . تكون الصورة مقلوبة على الفيلم وحجمها I يرتبط مع حجم الجسم بالعلاقة العادية ،

$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$

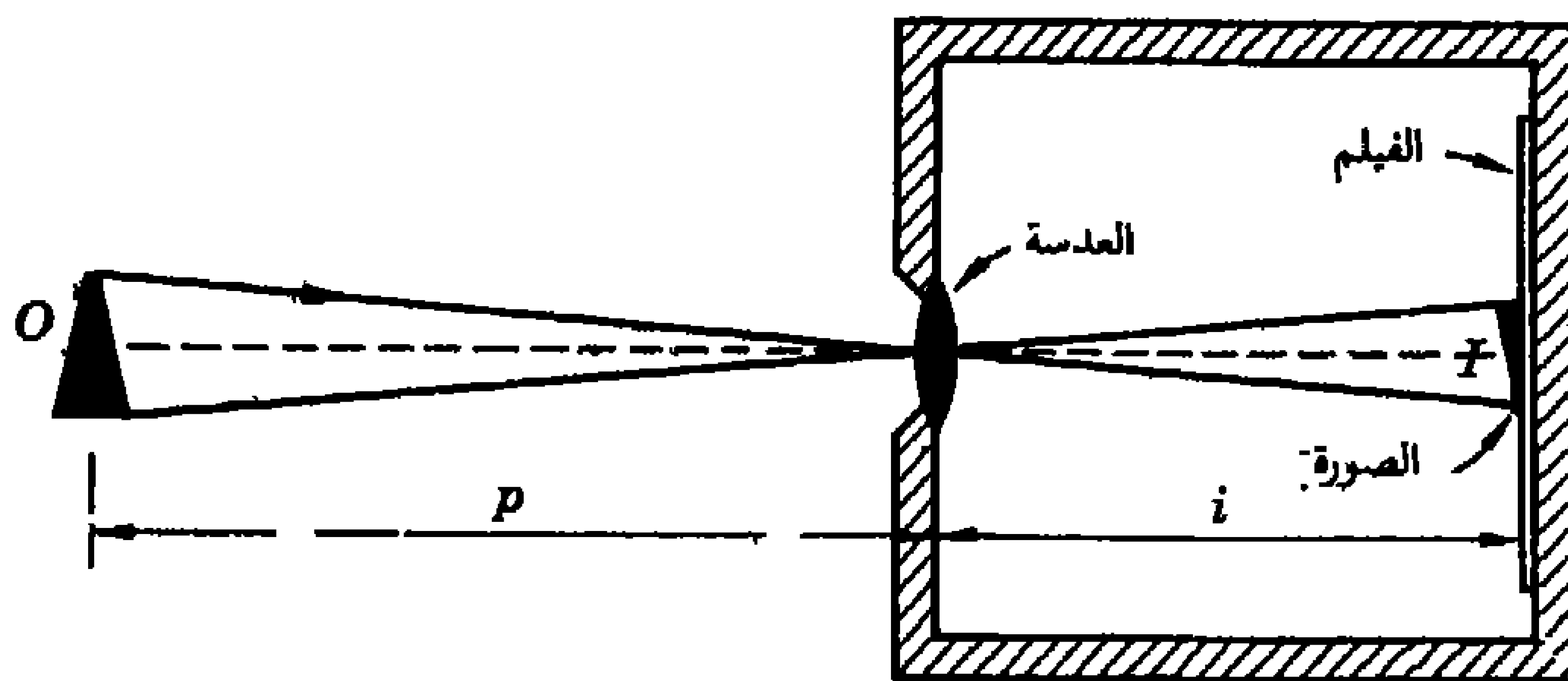
وعلى العكس من العين فان عدسة آلة التصوير لا يمكن جعل بعدها البؤرى متغيرا . ولذا للحصول على تركيز جيد للصورة على الفيلم فإن العدسة يجب أن تحرك للأمام وللخلف حين تتغير مسافة الجسم . وآلات التصوير التى ليس بها عدسات متحركة لديها عادة ثقب صغير مفتوح أمام العدسة ، أى أنها تعمل كالكاميرا ذات الثقب التى لا عدسات لديها مطلقا فهى لا تستعمل سوى ثقب يسمح للضوء بالسقوط على الفيلم . وسيعالج عمل مثل هذه الآلة كسؤال فى نهاية هذا الفصل .

تحتوى آلات التصوير باهظة الثمن على أنظمة معقدة من العدسات بدلا من عدسة منفردة ودرجة التعقيد تكون ضرورية اذا أريدت صورة حادة جدا وسرعات فائقة للغلق . من الواضح كون الشرط الأول مفيدا . أما الشرط الثانى الخاص بسرعات الغلق فتتيح التقاط صور لأجسام تتحرك بسرعة ، فأى جسم متحرك لابد وأن يجعل الصورة مشوشة الى حد ما ، ولكن كلما قصر الزمن الذى يكون فيه غالق آلة التصوير مفتوحا ، كلما قل تشويش الصورة الى حد ما . وحيث أن الغالق يجب أن يفتح مدة كافية تتيح لقدر كاف من الضوء أن يقع على الفيلم لذا فإن السرعات العالية للغلق تعنى أن تكون المدة كبيرة بدرجة تسمح لكمية من الضوء أن تدخل الى آلة التصوير .

وكما رأينا عند مناقشة معادلة العدسة لا يستخدم سوى الجزء الأوسط من عدسة كروية ، إذا أردنا الحصول على صورة واضحة . وتزداد أهمية هذا الأمر إذا استخدمت آلة التصوير لالتقاط صور عن قرب لأن العدسة وقتها يجب أن تكون محدبة جدا . ولا يمكن ازالة عيوب التركيز الملازمة لعدسة منفردة إلا باستعمال مجموعة مركبة من العدسات وعندئذ يقال أن العدسة قد صححت ضد **الزيغ الكروى** .

عيوب العدسات

وهناك عيب آخر للعدسات يسبب وجود أطراف ملونة بالصور ويسمى **الزيغ اللونى**. وهو ينتج من حقيقة أن سرعة الضوء فى الزجاج تختلف باختلاف الطول الموجى . ونتيجة لهذا فإن معامل انكسار الزجاج ليس ثابتا لجميع الألوان، فالضوء



شكل ٢٤ – ٤
تكون آلة التصوير البسيطة صورة مقلوبة على الفيلم وفى الحياة العملية يكون الثقب الموجود امام العدسة أضيق بكثير عما هو مبين كما أن هناك غالقا يغطى الفتحة ولا يفتح إلا حين تلتقط الصورة

الأزرق يتركز بقوة أكبر فى البؤرة بواسطة العدسة عن الضوء الأحمر وهذا يجعل الألوان فى حزمة من الضوء العادى تتفرق فتصبح الصورة ملونة .

لتصحيح هذا العيب توضع طبقات من نوعين أو أكثر من الزجاج وتتكون منها العدسة.والعدسات الباهظة الثمن تتكون من عدة عدسات منفردة ملتصقة ببعضها البعض . وتسمى العدسة التى عولجت جزئيا ضد الزيغ اللونى **بالعدسة اللالونيه** . على أنه من المستحيل إزالة هذا العيب من عدسة ما بشكل نهائى ، فالعدسات المستخدمة فى الأجهزة الغالية مثل الميكرسكوبات الجيدة جدا عادة ما تكون معقدة جدا بالفعل ، فهى لا تصحح النظام فحسب ضد الزيغ الكروى واللونى وانما تقوم بعمل تصحيح لعيوب أخرى بالعدسة أيضا . وعلى هذا يكون تصميم جهاز ضوئى دقيق على درجة عالية من التعقيد . ويمكنك قراءة المزيد عن هذا الأمر فى الكتب المتقدمة التى تبحث فى البصريات الهندسية .

٢٤ – ٣ مجموعات العدسات المتقاربة :
وحدة الديوبتر

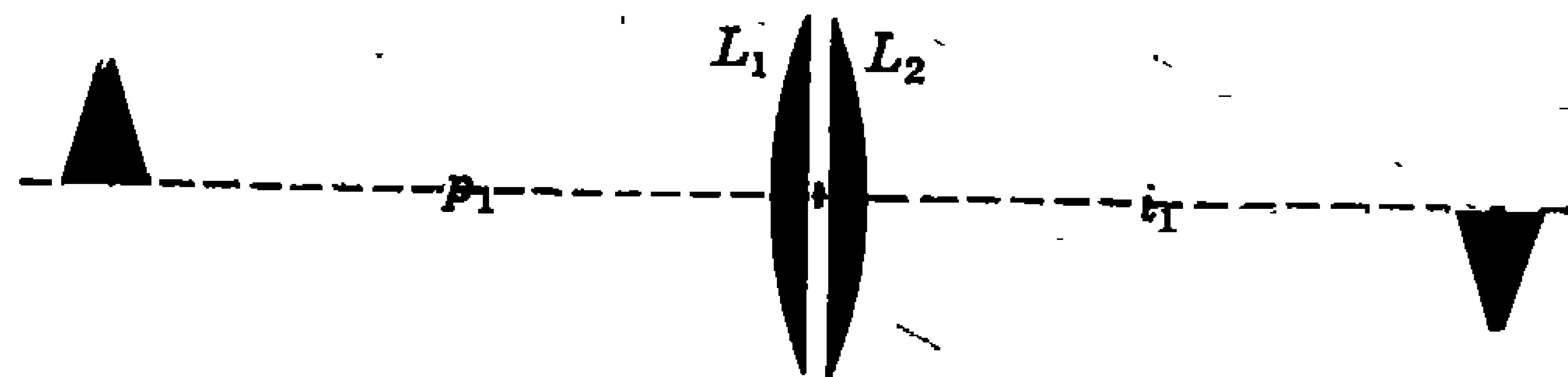
ربما تكون قد فحصت عينيك ولاحظ أن من يفحصها يضع دائما عدة عدسات دفعة واحدة أمام عينيك احداها أمام الأخرى . ولكى يصل الى أنسب مجموعة من العدسات يحتاج الفاحص الى معرفة كيف يضيف تأثيرات العدسات الرقيقة التى تكون مجموعة متقاربة . ويمكن اشتقاق العلاقة المطلوبة بسهولة كما سنرى . وسنفرض فقط أن الأبعاد البؤرية للعدسات أكبر بكثير من المسافات بين العدسات .

بالرجوع الى الشكل ٢٤ – ٥ نوجد أولا الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى ،

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{f_1}$$

ثم نستخدم هذه الصورة كجسم للعدسة الثانية فيكون بعد الجسم هو $p_2 = -i_1$ اذا ما تجاهلنا المسافة الضئيلة التى تفصل العدسات . أما الإشارة السالبة فقد استعملناها لأن الجسم يقع فى الجانب الخطأ للعدسة وقاعدة الاشارات التى اتفقنا عليها تستلزم أن يكون بعد الجسم سالبا فى مثل هذه الحالات . والآن ، بكتابة معادلة العدسة للعدسة الثانية نجد أن :

$$\frac{1}{-i_1}+\frac{1}{i_2}=\frac{1}{f_2}$$



شكل ٢٤ – ٥
إذا كانت العدستان قريبتين جدا من بعضهما البعض فإن اثرهما المشترك هو أن يعملا كعدسة واحدة بعدها البورى هو $1/f = 1/f_1 + 1/f_2$

إذا أضفنا هاتين المعادلتين الى بعضهما ، نجد أن

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{i_2}=\frac{1}{f} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{p_1}+\frac{1}{i_2}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$$

حيث يعطى البعد البؤرى المشترك للعدستين بالمعادلة :

f لمجموعة العدسات

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2} \quad \text{مجموعة متقاربة} \qquad (\text{٢٤ - ١})$$

وكما نرى تتصرف عدستان رقيقتان تكونان مجموعة متقاربة وكأنهما عدسة واحدة بعدها البؤرى يعطى بالمعادلة (٢٣ - ١)

ولكى نوفر على الفاحص مشقة جمع المقلوبات ، نعرف وحدة جديدة تستخدم مقلوب البعد البؤرى . **قوة العدسة بالديوبتر** هى مقلوب البعد البؤرى بالأمتار ، فقوة عدسة مفرقة بعدها البؤرى 20 cm مثلا هى $\frac{1}{(-0.20)}$ أو -5 diopters

تعريف

مثال توضيحى ٢٤ - ٣ : لصقت ثلاث عدسات أبعادها البؤرية على الترتيب هى 20 ، 30- ، 60 cm . أوجد البعد البؤرى للمجموعة .

طريقة الحل : تكون قوى هذه العدسات كالتالى 5 ، $-\frac{10}{3}$ $\frac{10}{6}$ diopters أما القوة المشتركة فهى

$$\frac{30}{6}-\frac{20}{6}+\frac{10}{6}=\frac{20}{6}\ \text{diopters}$$

وبهذا يكون البعد البؤرى للمجموعة هو $\frac{6}{20}$ أو 0.3 m . من الشيق ملاحظة أنه لو كانت العدسة $\frac{10}{6}$- diopters سالبة لكان أثر العدسات الثلاثة كأثر لوح من الزجاج المسطح تماما .

٢٤ - ٤ العدسة المكبرة (المكبر البسيط)

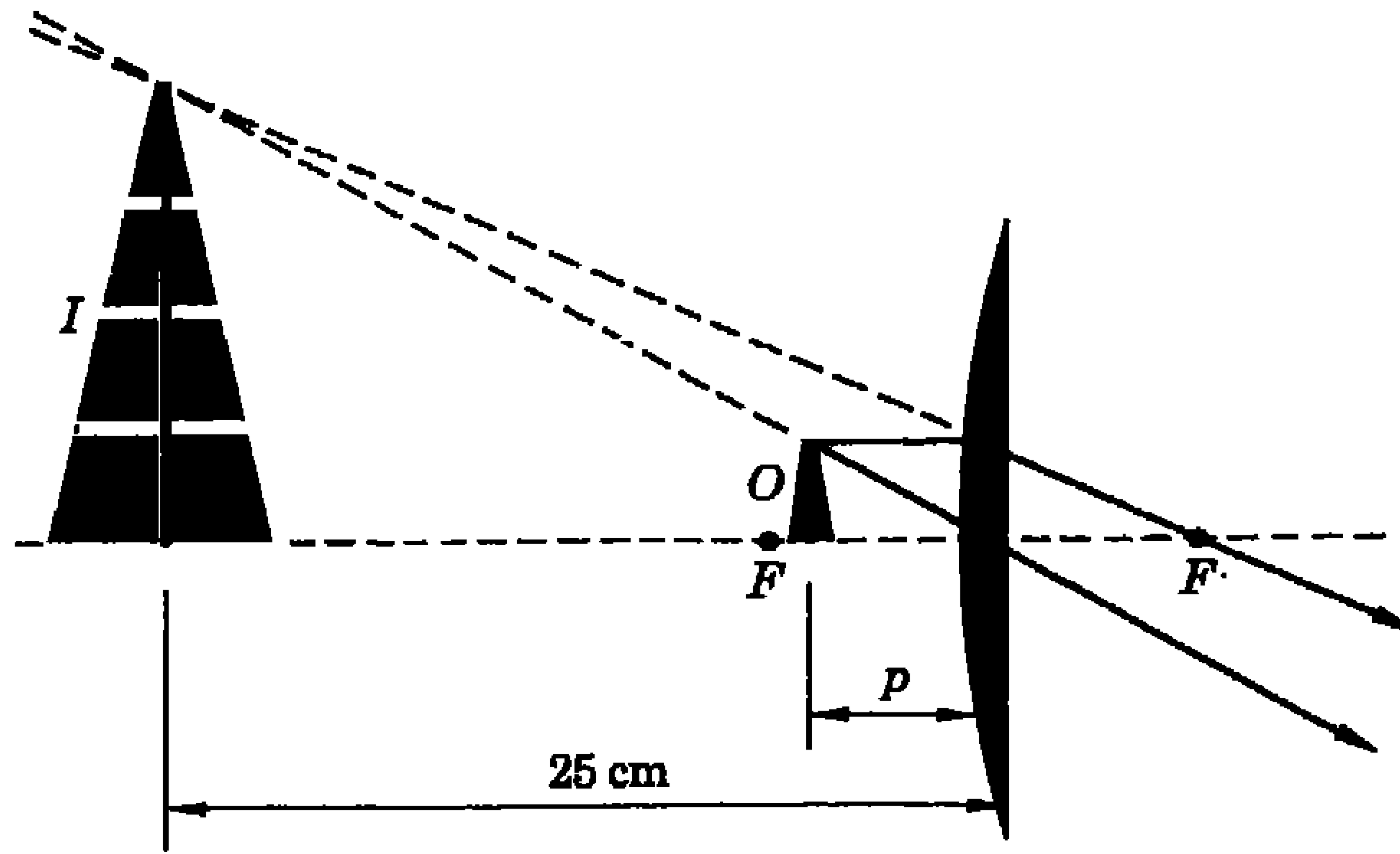
يستطيع الشخص الطبيعى أن يرى جسما ما بوضوح إذا كان يبعد 25 cm عن عينيه أو كان أبعد من ذلك. يوضح الشكل ٢٤ - ٦ الصورة المتكونة على شبكية العين عندما يوضع جسم عند تلك المسافة . ولو أننا استطعنا أن نركز الصورة بشكل صحيح حين يكون الجسم أقرب ، لأصبحت الصورة على الشبكية أكبر بكثير ، كما يبين الجزء (ب) من الشكل ٢٤ - ٦ ويمكن عندئذ رؤية التفاصيل الدقيقة للجسم بشكل أفضل لأنه سيظهر أكبر بكثير على الشبكية .

شكل ٢٤ – ٦
حين يقترب جسم من العين فإن الصورة على الشبكية يزداد حجمها



ولكى يرى جسم ما بوضوح ، أى ليتركز فوق الشبكية حين يكون أدنى من 25 cm فإننا نحتاج الى استعمال عدسة مجمعة لتساعد عدسة العين. ويوضح الشكل ٢٤ – ٧ أثر مثل هذه العدسة المكبرة . إذا وضع الجسم – كما ترى – داخل النقطة البؤرية للعدسة فإن صورة تقديرية للجسم تتكون أبعد بكثير من العدسة. فإذا كانت العين خلف العدسة مباشرة فإن الصورة يمكن رؤيتها بوضوح إذا كانت تبعد 25 cm أو أكثر من العدسة كما هو مبين .

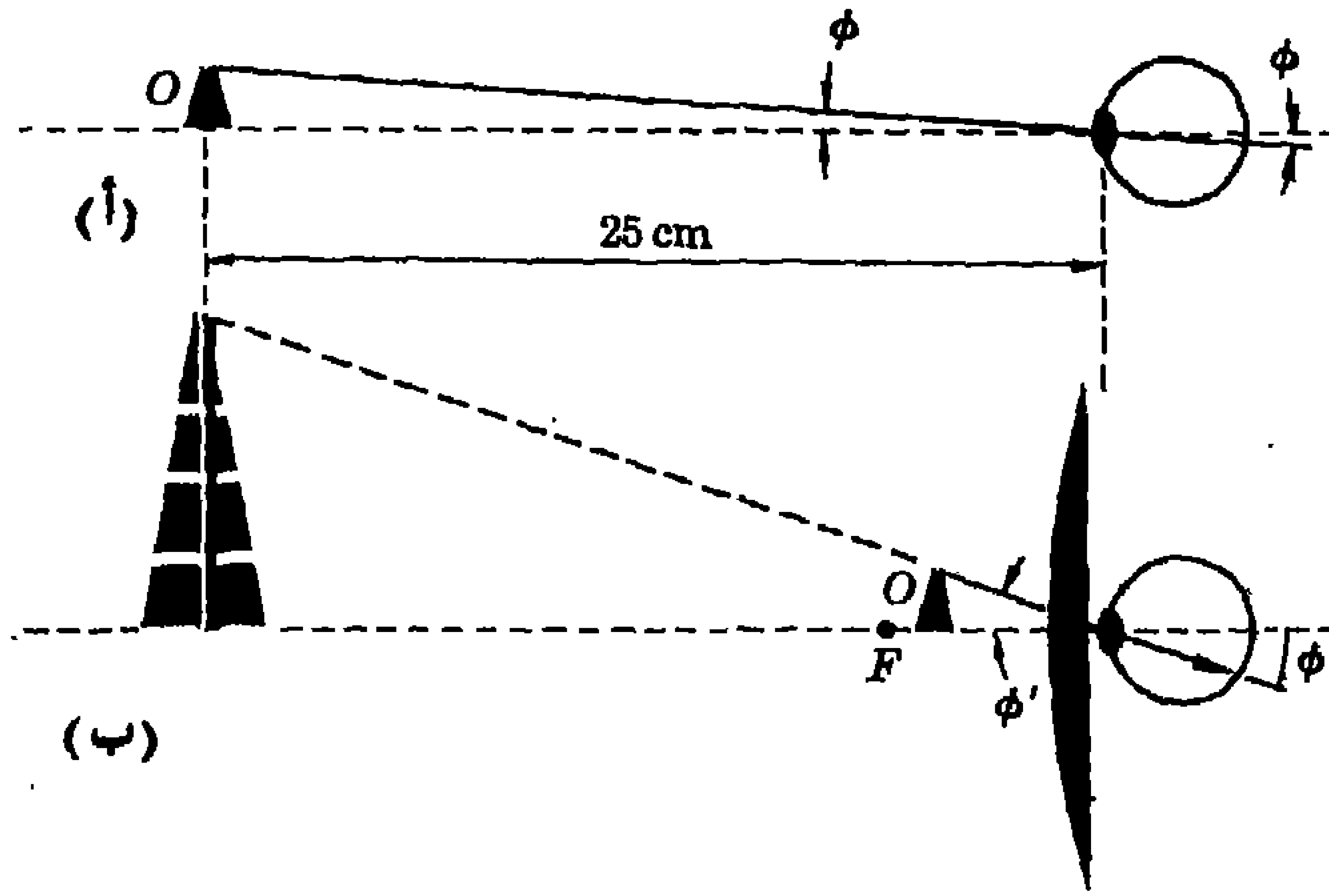
شكل ٢٤ – ٧
تتيح العدسة المكبرة أن يوضع الجسم المفحوص على مسافة من العين أقرب مما لو استخدمت العين المجردة بمفردها



لندرس الآن ما هو أثر مثل هذه العدسة – اذا استخدمت بهذا الشكل – على حجم الصورة المتكونة على الشبكية . يوضح الشكل ٢٤ – ٨ أ الصورة المتكونة على الشبكية حين يبعد الجسم مسافة 25 cm عن العين بدون مساعدة العدسة المكبرة . أما الجزء (ب) من الشكل نفسه فيمثل إعادة للشكل ٢٤ – ٧ مع إضافة رسم العين التى تنظر فعلا الى الصورة التقديرية المتكونة بواسطة العدسة المكبرة . على أن حجم الصورة المتكونة على الشبكية هو نفسه لو أن العين تركزت على الجسم الحقيقى الذى يقرب الآن عن 25 cm . وعلى هذا فاستخدام العدسة يجعل الصورة على الشبكية أكبر عما لو لم تستخدم العدسة . وهذه هى النتيجة الحتمية لحقيقة أن العدسة قد أتاحت لنا رؤية الجسم على مسافة أقرب من النقطة القريبة الطبيعية وهى 25 cm . تعرف **قوة التكبير** M لنبيطة ضوئية على أنها النسبة بين الزاوية المقابلة للصورة المتكونة على الشبكية حين تستخدم النبيطة والزاوية المقابلة .

قوة التكبير

للصورة حين يرى الجسم مباشرة على بعد 25 cm ، أو بالرجوع الى الشكل ٢٤ - ٨ ،



شكل ٢٤ - ٨
تركز العين فى كلتا الحالتين على المثلث الذى يبعد عنها 25 cm . الجسم الحقيقى يبعد عن العين بمسافة أقل من 25 cm فى (ب) وعلى ذلك فالزاوية المقابلة له أكبر بكثير

$$M = \frac{\phi'}{\phi}$$

وتختلف قيمة M الحقيقية الى حد ما حسب كيفية إمساك العدسة المكبرة وكيفية تركيز العين وهناك تقريب معتدل فى مثل هذه الحالات وهو القول بأن العين خلف العدسة مباشرة وأن الجسم موضوع أقرب ما يكون الى النقطة البؤرية للعدسة . وعلى هذا فللزوايا الصغيرة التى عادة ما تستعمل فإن الزاوية تكون مساوية تقريبا لظلها وجيبها . ومن ثم فمن الشكل ٢٤ - ٨ لدينا ،

$$\frac{O}{f} \approx \phi' \qquad \text{و} \qquad \phi = \frac{O}{25}$$

التى تعطينا ،

$$M = \frac{\phi'}{\phi} = \frac{25}{f} \qquad f \text{ بالسنتيمتر}$$

M للمكبر وعند التناول الأكثر دقة لهذا الأمر نجد أن $M = (25/f) + 1$ ولكن لمعظم الأغراض تكفى المعادلة المعطاة آنفا (لماذا ؟) .

إذن فالعدسة ذات قوة التكبير الضخمة يكون بعدها البؤرى صغيرا ، أى أنها تكون مجمعة بشكل هائل . إذا كانت $f = 4$ cm فإن قوة التكبير تكون 6.25 ويبدو الجسم مكبرا حوالى ستة أضعاف عما لو رأيناه بدون العدسة المكبرة .

٢٤ - ٥ الميكروسكوب (المجهر)

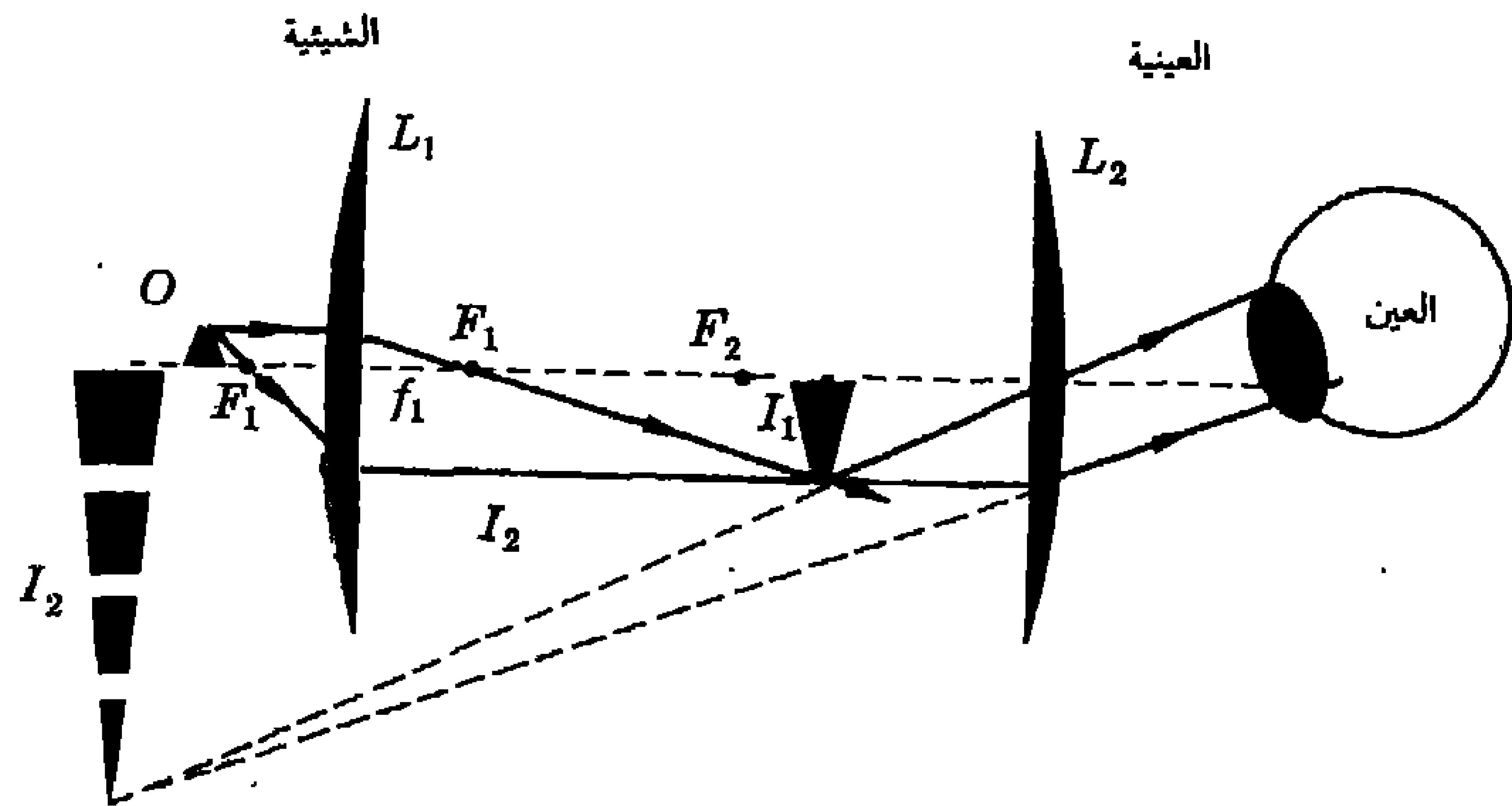
لقد رأينا فى القسم السابق أن قوة التكبير لعدسة مكبرة بسيطة هى حوالى $25/f$ ولما كان يجب وضع الجسم بداخل البعد البؤرى للعدسة ، فمن المستحيل جعل f قصيرة الى أقصى حد . أى أن قوة التكبير محدودة بهذا الاعتبار وكذا اعتبارات عملية أخرى . أما الميكروسكوب المركب فيتيح تكبيرا أعظم باستخدام عدستين مجمعتين والشكل ٢٤ - ٩ يعرض رسما للميكروسكوب .

فى هذه النبيطة تقوم العدسة الأولى وهى **العدسة الشيئية** ، بتكوين صورة حقيقية I_1 للجسم . لاحظ أن الجسم يوضع خارج النقطة البؤرية للشيئيه مباشرة . ولما كانت $I/O = i/p$ فإن I_1 تكون أكبر من الجسم بمعامل قدره i_1/p_1 . ولما كان الجسم يوضع عادة بالقرب من النقطة البؤرية ، إذن $p_1 \approx f_1$، بالإضافة الى هذا فالصورة I_1 ستكون قريبة من العدسة الثانية كما سنرى حالا وبالتالى فان i_1 ستكون بالضرورة مساوية لطول قصبة الميكروسكوب التى تبلغ فى معظم الحالات حوالى 18 cm وعلى هذا ستبلغ I_1 حوالى $18/f_1$ مرة أكبر من الجسم الأصلى .

أما العدسة الثانية وهى ، **العدسة العينية** ، فتستخدم لرؤية الصورة التى كونتها العدسة الشيئية . وعلى هذا فان I_1 يجب أن تقع بداخل بعدها البؤرى الصغير نوعا ما ، والأكثر من هذا ، فللرؤية الجيدة يجب أن تكون الصورة التقديرية I_2 التى تكونها العينية على بعد 25 cm تقريبا من العدسة العينية . وكما بينا فى القسم السابق فإن قوة التكبير للعدسة العينية لو استخدمت كعدسة مكبرة تكون $25/f_2$ على أن العدسة الشيئية قد كبرت الجسم بالفعل بعامل قدره $18/f_1$ ولذا فالزاوية المقابلة للصورة I_1 عند العين المجردة تبلغ $18/f_1$ مرة قدر الزاوية المقابلة للجسم الاصلى . ومن ثم فقوة التكبير الكلية للميكروسكوب هى

$$M = \left(\frac{18}{f_1}\right)\left(\frac{25}{f_2}\right)$$

M لميكرسكوب بسيط



شكل ٢٤ - ٩
ترى العين الصورة النهائية I_2 . لقد زاد الميكروسكوب كثيرا من الزاوية المقابلة عند العين

حيث f_1 ، f_2 بالسنتيمترات

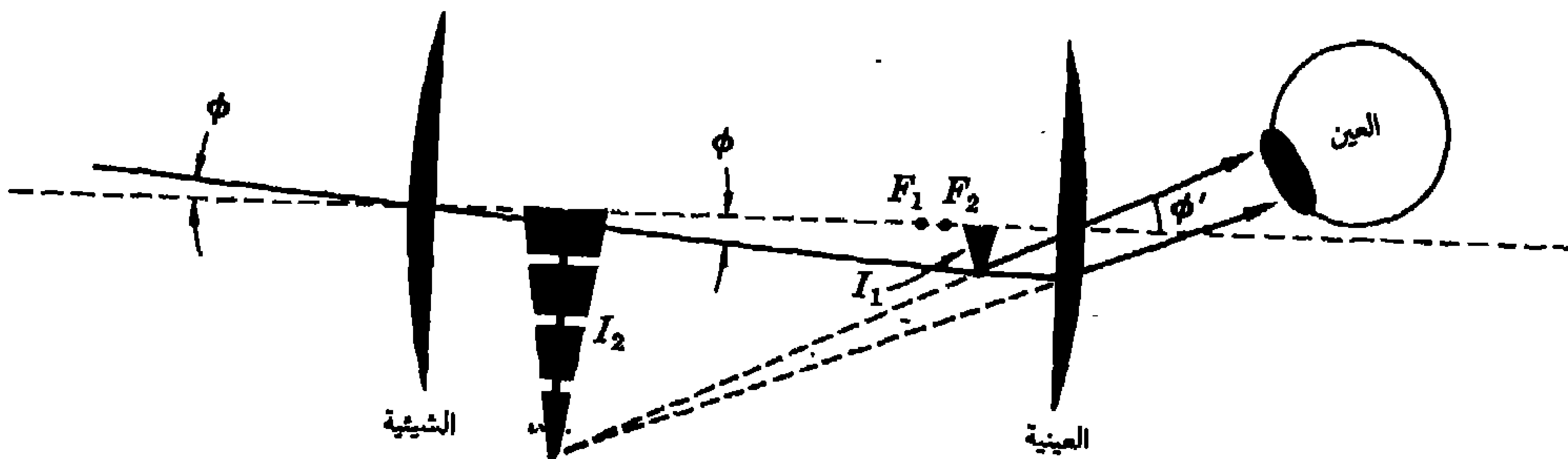
يجب – كما نرى – جعل f_1 ، f_2 صغيرين لكى نحصل على أقصى تكبير . ولانجاز هذه المهمة يستخدم فى الميكروسكوبات الجيدة مجموعات معقدة من العدسات مكان العدسة العينية والعدسة الشيئية . ويجب توفر العناية الفائقة عند تصميم العدسات والا تسببت أنواع الزيغ المختلفة فى العدسات فى تشوية وتلوين الصورة بشكل خطير يؤدى الى جعل الجهاز عديم القيمة تقريبا .

٢٤ – ٦ التلسكوب (المقراب) الفلكى

هناك مشكلتان رئيسيتان تواجهان الفلكيين عند تصميمهم لتلسكوب يستخدم لرصد القمر أو بعض الكواكب البعيدة ، فهم يريدون أن يبدو الجسم أكبر مما يرى بالعين المجردة وهم يريدون أيضا أن يزيدوا من كمية الضوء الخافتة التى تصل الى العين المجردة مباشرة من الكوكب . وللتغلب على المشكلة الأخيرة فهم يستخدمون عدسة شيئية أو عدسة تكون من الكبر بحيث تجمع قدرا كبيرا من الضوء من النجم ، فأحد التلسكوبات فى مرصد ييركس به عدسه شيئية يبلغ قطرها 40 in وبعدها البؤرى 62 ft من الواضح أن مثل هذه العدسة الضخمة ستجمع أكبر بكثير مما تجمعة فتحة العين الصغيرة جدا ويوضح الشكل ٢٤ – ١٠ ذلك التلسكوب .

تكون الشيئية – كما هو موضح – صورة I_1 للجسم البعيد وتكون هذه الصورة قريبة جدا من F_1 ، وهى النقطة البؤرية للعدسة الشيئية، وذلك لأن الضوء الصادر من الجسم البعيد يكون متوازيا تقريبا . تقوم العدسة العينية كالمعتاد بعمل عدسة مكبرة للنظر الى الصورة التى كونتها العدسة الاولى .

شكل ٢٤ – ١٠
يزيد التلسكوب ذى العدستين الموضح من الزاوية المقابلة عند العين بشكل كبير ولكن الصورة النهائية تكون مقلوبة



من الطبيعى أن تكون الصورة المتكونة بالعدسة العينية تقديرية وتبعد 25 cm عن العدسة العينية .

لإيجاد قوة تكبير هذه النبيطة نلاحظ أنه لو نظرت العين المجردة الى الكوكب البعيد فإن الزاوية المقابلة ϕ ستكون هى نفسها بالنسبة للعدسة العينية . (لماذا ؟) . وعلى ذلك فلو كانت ϕ صغيرة بحيث يمكن وضع ظلها مكانها فان ،

$$\phi \approx \frac{I_1}{f_1}$$

وذلك لأن الصورة قريبة جدا من النقطة البؤرية . وحيث أن النقطة البؤرية للعدسة العينية المكبرة هى أيضا بالقرب من I_1 فان ،

$$\phi' \approx \frac{I_1}{f_2}$$

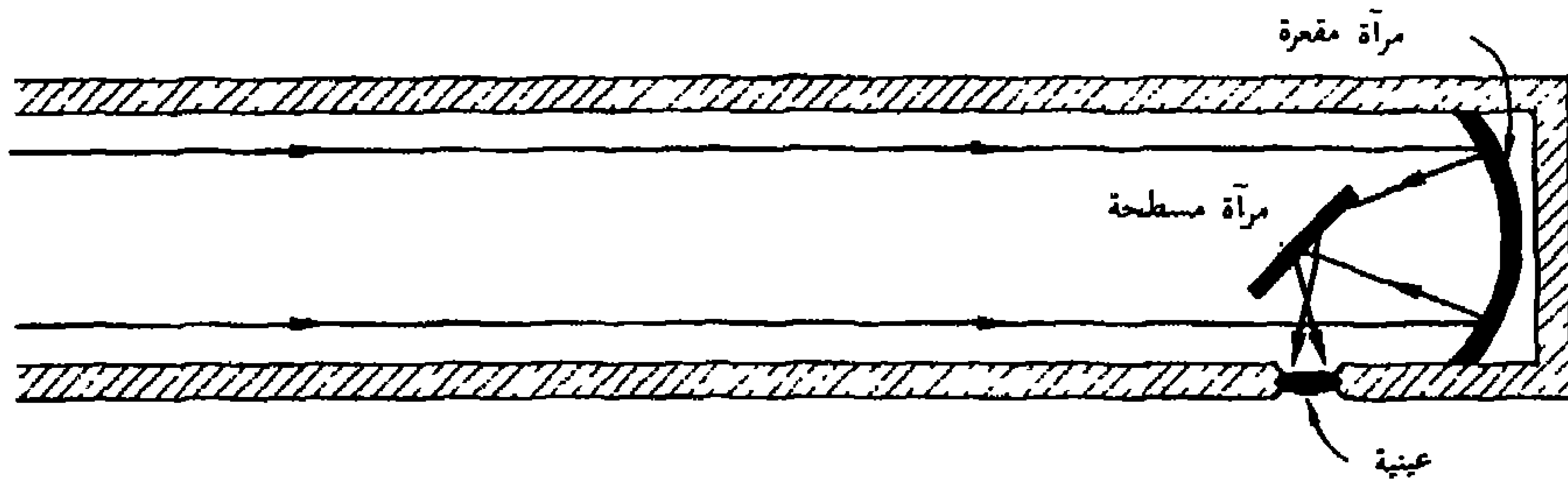
اذا قسمنا المعادلة الأخيرة هذه على المعادلة الأولى فاننا نجد قوة تكبير التلسكوب .

$$M = \frac{\phi'}{\phi} = \frac{f_1}{f_2}$$

M للتلسكوب

ومن هنا نرى أن البعد البؤرى للشيئية يجب أن يكون طويلا وأن البعد البؤرى للعينية يجب أن يكون قصيرا .

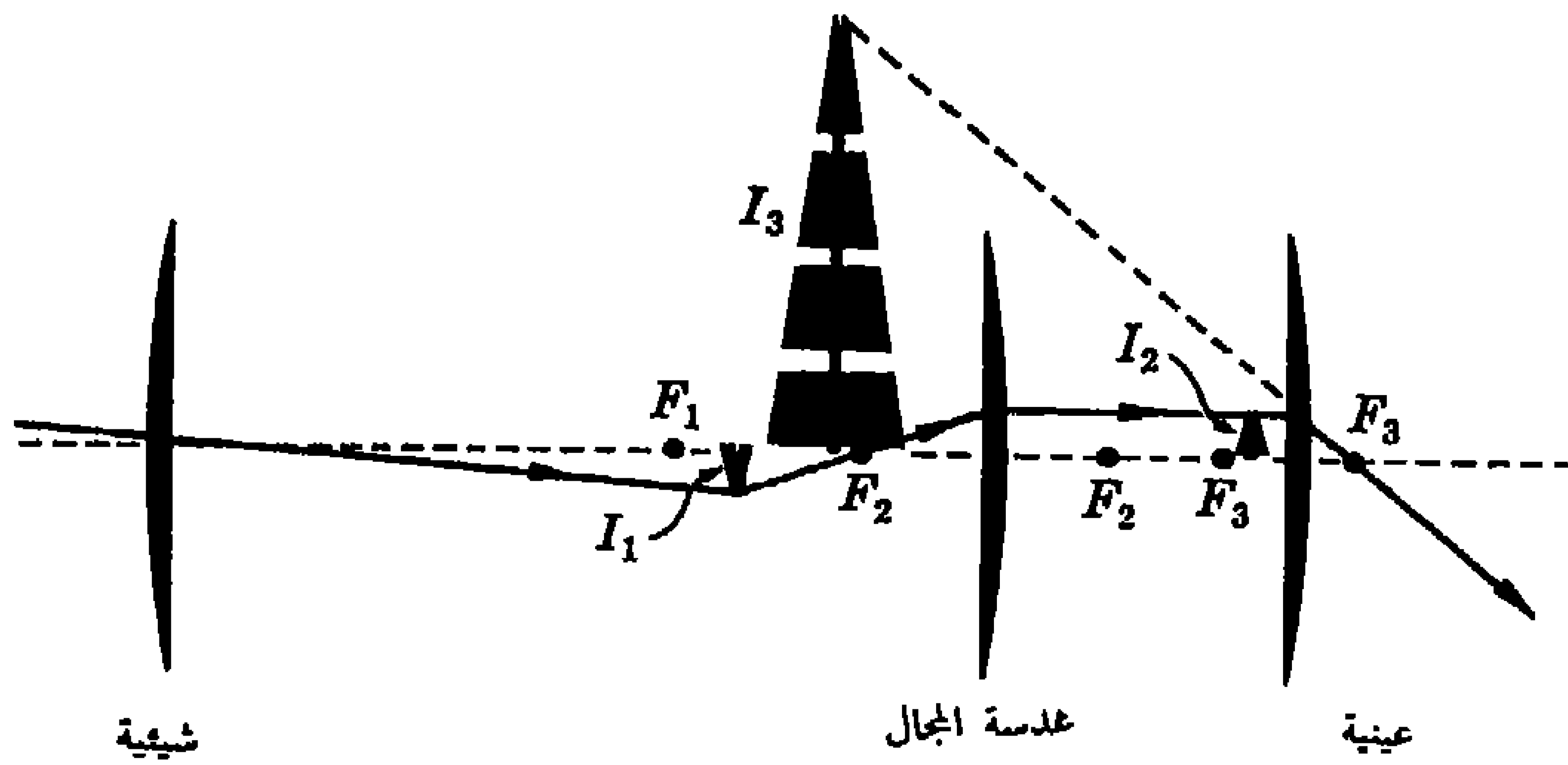
لما كان من الصعب عمل عدسات كبيرة كاملة فإن كثيرا من التلسكوبات الفلكية تستخدم مرآة مقعرة مكان العدسة الشيئية . وأحد الترتيبات المتبعة فى مثل تلك التلسكوبات موضح فى الشكل ٢٤ - ١١ ، وقد بولغ فى حجم المرآة الحارفة المسطحة . ولا يتأثر التلسكوب العاكس بالزيغ اللونى إلا عند العينية . علاوة على ذلك ، يمكن إلغاء الزيغ الكروى من المرآة باستخدام مرآة مكافئة المقطع . ولما كان من الأسهل صنع مرايا جيدة كبيرة عن صنع عدسات كبيرة فانه يصبح واضحا سبب تفضيل التلسكوبات العاكسة أحيانا .



شكل ٢٤ - ١١
رسم تخطيطى لتلسكوب عاكس . المرآة المسطحة أصغر بكثير عما هى عليه فى الرسم

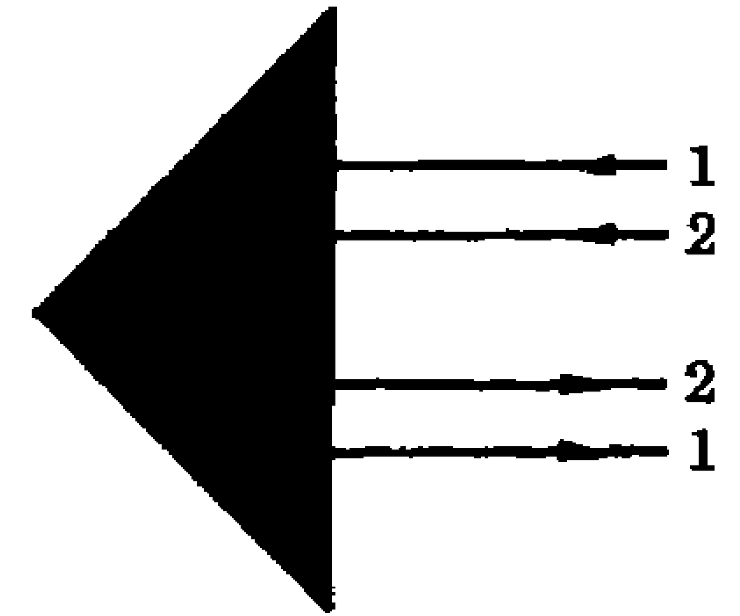
٢٤ - ٧ التلسكوب (المقراب) الأرضى

على الرغم من أن التلسكوب الفلكى يفى بأغراض رصد النجوم إلا أنه غير صالح تماما لمعظم العمل على الأرض وتنشأ الصعوبة من أن التلسكوب الفلكى يقلب الصورة كما هو واضح بالرجوع الى شكل ٢٤ - ١٠ ولرؤية الأشياء معتدلة فإن التلسكوب الأرضى يستعمل عدسة ثالثة كما هو مبين فى الشكل ٢٤ - ١٢ لاحظ أن عدسة المجال موجودة لمجرد أن تقلب الصورة I_1 إلى I_2 وأن الصورة النهائية التى تراها العين ، I_3 هى صورة معتدلة .



شكل ٢٤ - ١٢
التلسكوب (المقراب) الأرضى . لم يعط فى الشكل سوى شعاع واحد وعليك مع هذا اثبات أن الصور تتكون فعلا فى المواضع المبينة

توجد هذه النبيطة عادة فى أنبوبة طويلة نوعا ما وعادة تسمى **نظارة مقربة** وهى ليست ملائمة للإستعمال وتستبدل فى أغلب الأحوال بمنظار ثنائى العينية منشورى ويتم فى هذه النبيطة قلب الصورة بالإنعكاس الكلى الداخلى بداخل منشورين . يقوم المنشور الأول بعدل الصورة كما هو موضح فى الشكل ٢٤ - ١٣ . بينما يقوم المنشور الآخر وهو عمودى على الأول بتحويل الشعاع مرة أخرى ويعكس الإتجاه الأفقى للصورة . ولا تعيد المنشورات الصورة الى اتجاهها الصحيح فحسب ولكنها تقصر طول الأنبوبة بين الشيئية والعينية بشكل كبير .

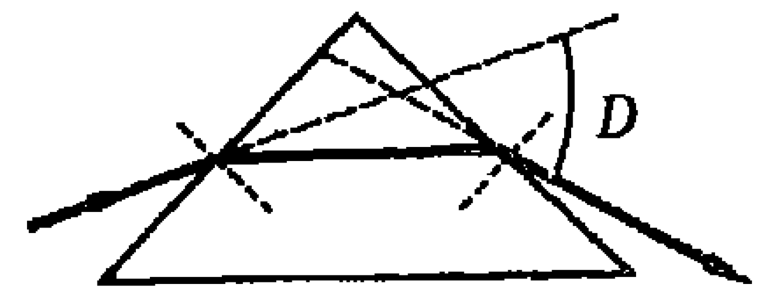


شكل ٢٤ - ١٣
الصورة المقلوبة فى منظار ثنائى العينية تتحول الى معتدلة بالإنعكاس الكلى الداخلى فى المنشور كما هو موضح

٢٤ - ٨ (الاسبكتروسكوب (المطياف) المنشورى

سنتحدث بشكل متواتر فى الفصول القادمة عن الطيف (أو ألوان الضوء) الذى تصدره الذرات المختلفة . وهذه الأطياف يمكن مشاهدتها بواسطة أجهزة تسمى **اسبكتروسكوبات (أو مطاييف)** وهى تنقسم الى نوعين ، سنناقش هنا نوعا واحدا فقط منها ، أما الثانى فسنتناوله فى الفصل القادم . فاهتمامنا الآن سينصب على الإسبكتروسكوب المنشورى .

هناك نبيطة كثيرا ما تستخدم لفصل الضوء الى ألوان متعددة وهى المنشور الذى يصنع عادة من الزجاج وهناك رسم يوضحه فى الشكل ٢٤ - ١٤ . فشعاع الضوء ينحنى عادة مرتين الأولى حين يدخل والثانية حين يخرج من المنشور . وتسمى الزاوية الكلية التى ينحنى بها الشعاع **زاوية الانحراف** وهى الزاوية D فى الشكل



شكل ٢٤ - ١٤
يحرف المنشور الموضح شعاع الضوء بزاوية قدرها D



صورة
مأخوذه عن مكتب الاستعلامات والاخبار الاسترالى ، تصوير د. مور

علم الفلك الاشعاعى

لقد ظلت التلسكوبات البصرية هى الوسيلة الحساسة الوحيدة للنظر الى أعماق الفضاء . وهذه التلسكوبات تتحدد الرؤية فيها بالأطوال الموجية للإشعاع الكهرمغناطيسى الذى يمكن رؤيتة بالعين أو تصويره . ويشكل هذا المدى – كما نعلم – جزء صغيرا من الطيف الكهرمغناطيسى الكلى يستتبع هذا أن التلسكوبات البصرية قادرة فقط على رصد تلك الأجسام الموجودة فى الفضاء الخارجى والتى تبعث ضوء قويا . ومن الطبيعى أن هذه الأجرام يجب أن تكون محماة لدرجة الإبيضاض حتى تظهر مضيئة .

ولابد أن نتساءل عما إذا كنا نفتقد الكثير مما يوجد فى الفضاء الخارجى،وذلك لأننا لا نرى بالتلسكوبات البصرية سوى الشموس الساخنة وهى الأجرام المتوهجة . ولو أمكننا أن « نرى » أجراما أكثر برودة فى الفضاء ، فربما وجدنا أجراما جديدة كالشموس التى بردت أو شموسا لم تولد بعد . ولهذا الغرض يلزمنا نبيطات تستطيع رؤية أطوال موجية أطول من الضوء المرئى وعلى وجه الخصوص تلك التلسكوبات التى تستطيع رؤية أمواج اللاسلكى والتى ستكون ذات قيمة هائلة .. ومن هنا جاء الباعث على التسمية – علم الفلك الاشعاعى .

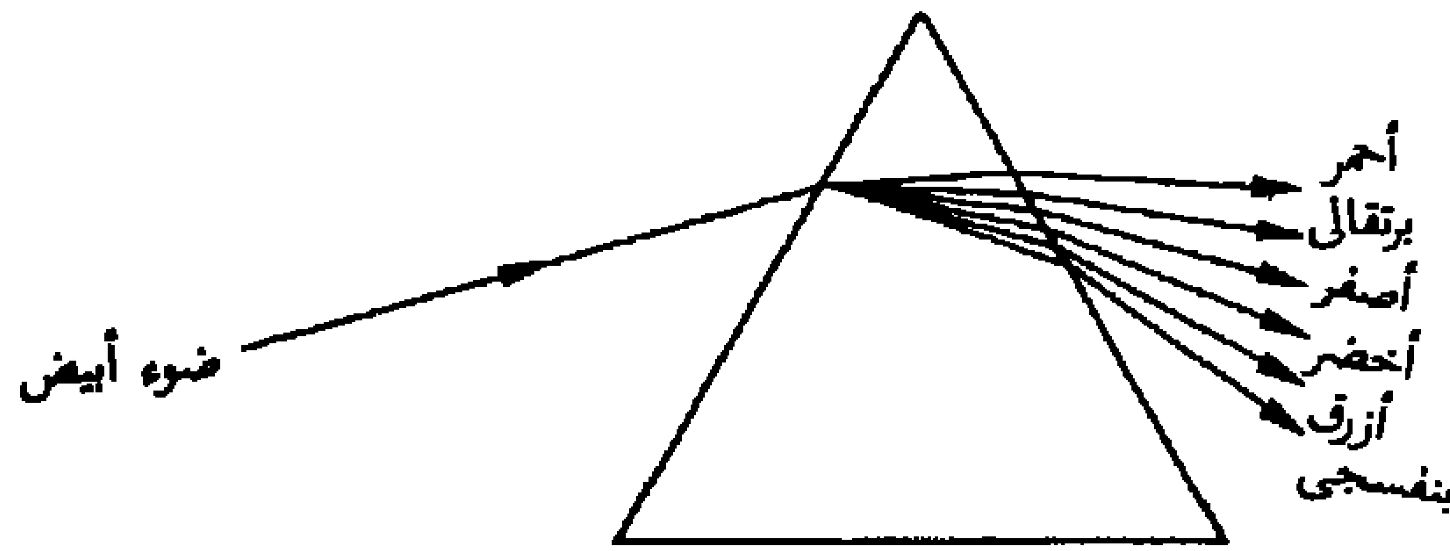
كما سنرى فى الفصل الخامس والعشرين ، يجب أن يكون هناك سطح أملس بدرجة تبلغ الطول الموجى للإشعاع حتى يمكن عكس أمواج ك.م. أما حجم العاكس فيجب أن يكون العديد من الأطوال الموجية . وتتطلب هذه القيود أن يستخدم التلسكوب الإشعاعى من النوع العاكس مرايا معدنية أكبر بكثير من الأطوال الموجية التى يراد رؤيتها به . على أن هذه المرايا لا تتطلب أن تكون على نفس القدر من النعومة التى تكون عليها المرايا المستخدمة للأطوال الموجية الأقصر . وفى الواقع يمكن استخدام سطحا من شبكية سلكية وقد تم هذا فعلا . وكلما كبرت المرآة زادت بالتالى كمية الطاقة التى تستطيع عكسها وتركيزها فى بؤرة،ولذا يفضل العاكس كلما كبر .

يوضح الشكل صورة لتلسكوب إشعاعى ضخم وهو يقع فى بقعة معزولة فى استراليا بعيدا عن أية مصادر للضوضاء اللاسلكية الصادرة عن مولدات موجودة على ظهر الأرض . وقد أمكن بواسطة هذا التلسكوب وغيره فى بقاع كثيرة من العالم اكتشاف كثير من الأجرام المجهولة حتى الآن فى الأغوار السحيقة للفضاء . تستخدم النبيطه المصورة أطوالا موجية مدى 10 cm و 20 cm وهى قادرة على اكتشاف مصادر للأمواج اللاسلكية تبعد عنا 5 مليون سنة ضوئية أى 10 مرات أبعد مما يمكن رؤيته بأى تلسكوب بصرى متاح الآن .

تقوم المرآة العاكسة وقطرها 210 ft مع شبكة معدنية مكافئة المقطع بتركيز أمواج اللاسلكى الورادة من الفضاء الخارجى ، ثم تقوم أجهزة استقبال الموجات بمتابعة ما يراه التلسكوب ،وهناك وسائل تكفل دوران العاكس الضخم بحيث يوجه التلسكوب حسب الرغبة نحو أية مساحة من السماء ترتفع 30° فوق الأفق .

بمعرفة زاوية السقوط وزوايا المنشور وكذا معامل انكسار الزجاج فإنه يصبح من الممكن – على الرغم من الصعوبة – حساب D باستخدام قانون سنل . على أنه يمكن ملاحظة أنه كلما كبر معامل الإنكسار للزجاج ، زاد انحراف الشعاع . ولهذا أثاره الهامة كما سنرى .

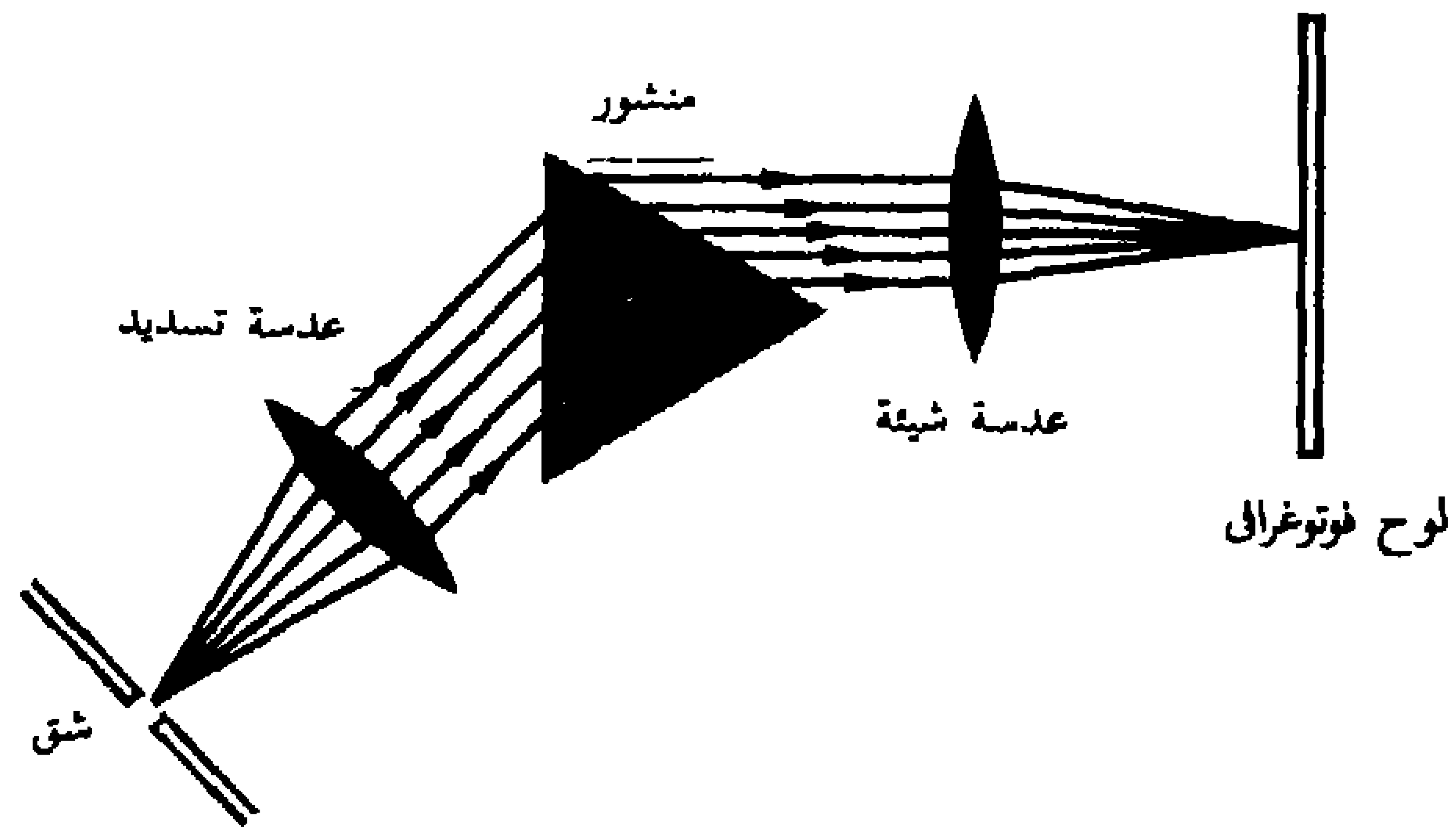
لقد ذكرنا من قبل أن سرعة الضوء فى كثير من المواد تتغير اعتمادا على الطول الموجى للضوء وهذا يكافىء القول بأن معامل الإنكسار عادة ما يعتمد على لون الضوء . ولمعظم المواد يكون معامل الإنكسار للضوء البنفسجى أكبر منه للضوء الأحمر ، ومن ثم ينحنى الضوء البنفسجى بصورة أشد من الضوء الأحمر داخل منشور زجاجى . وتبعا لهذا فإذا دخل شعاع من الضوء الأبيض فى منشور ، كما فى الشكل ٢٤ – ١٥ ، فان الضوء يتفرق الى ألوانه المختلفة كما فى الشكل . وتختلف القابلية على تفريق الضوء من مادة لأخرى . وللحصول على تفريق مرتفع يجب أن يتغير معامل الإنكسار مع الطول الموجى بشكل ملحوظ .



شكل ٢٤ – ١٥
ليست زاوية الانحراف بواسطة المنشور هى نفسها لجميع الأطوال الموجية واهذا يفرق المنشور الضوء الابيض الى مكوناته من الألوان .

فى الإسبكتروسكوب المنشورى يقوم المنشور بتفريق الأطوال الموجية للضوء القادم من المصدر الضوئى المراد فحصه . يأتى الضوء فى نبيطه نموذجية ، كالتى فى الشكل ٢٤ – ١٦ ، من المصدر الى شق ضيق فيضيؤه (لنفترض أن قوسا أصفر من الصوديوم يضىء الشق بحيث يصدر الشق أطوالا موجبة قريبة جدا من 5.89×10^{-5} cm وهو الضوء الأصفر (المميز) . ولما كان الشق يقع عند النقطة البؤرية لعدسة تسديد لذا تخرج منها الأشعة متوازية ثم تنكسر بالمنشور كما هو مبين (حيث أننا نفترض ضوءا أحادى اللون أى ضوء له لون واحد لذا ينحنى الضوء كله بنفس الطريقة) . تكون العدسة الشيئية صورة للشق عند نقطتها البؤريةفلو أن لوحا فوتوغرافيا وضع كما هو مبين بالشكل لالتقطت صورة خط واحد أو صورة الشق ، على هذا اللوح . ويمكن بالتبادل وضع تلسكوب مكان العدسة الشيئية واللوح الفوتوغرافى (وذلك لأن الضوء متوازى) وبهذا يمكن رؤية الخط الأصفر أو صورته بالعين مباشرة .

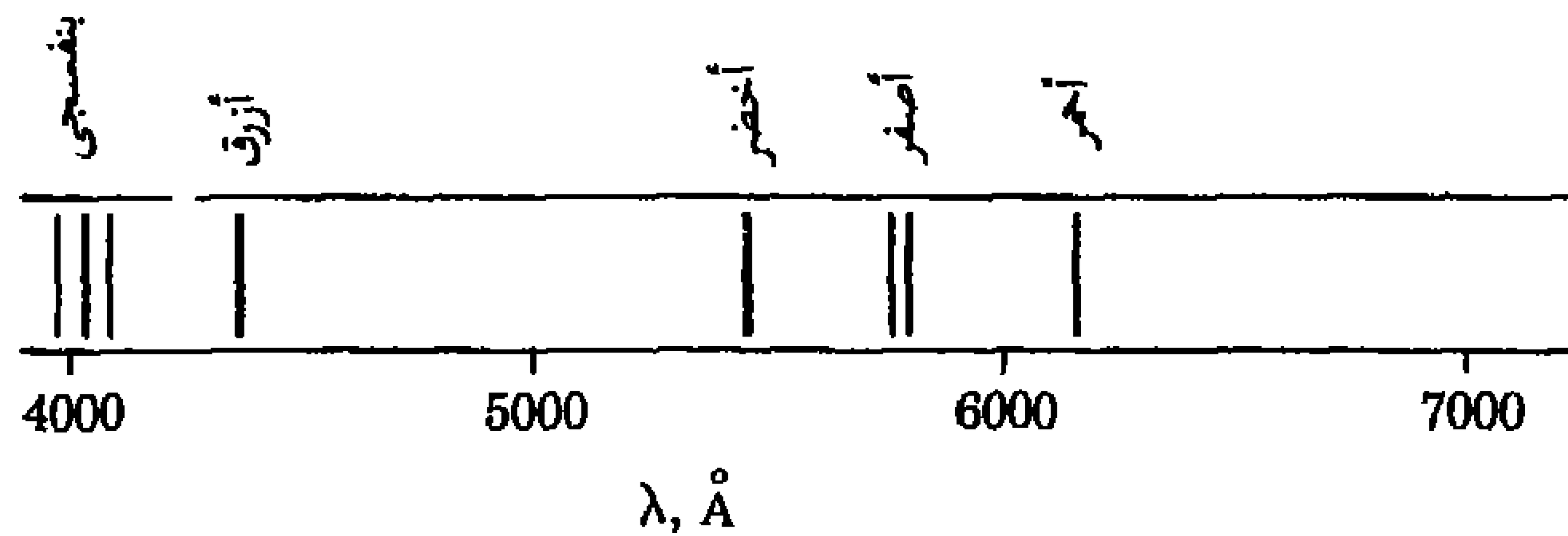
اما إذا استعمل ضوء من قوس زئبقى بدلا من ضوء الصوديوم ، فإن العديد من الخطوط سوف يصور فوتوغرافيا على اللوح وستبدو تلك الخطوط كما فى الشكل



شكل ٢٤ – ١٦
يمكن الحصول على صورة الشق على اللوح الفوتوغرافى بالإسبكتروسكوب المنشورى . ولكن إذا كان الضوء يحتوى على أكثر من طول موجى فإن صورا متعددة ستظهر فى الصورة الفوتوغرافية

خطوط الطيف

٢٤ – ١٧ . (هذا الطيف موضح بالألوان داخل اللوحة الملونة) . ولما كان كل من الألوان المحددة المتعددة والتى يبعث بها القوس الزئبقى ينحرف بصور مختلفة بواسطة المنشور لذا يظهر على اللوح الفوتوغرافى صورا متعددة للشق (أو الخطوط) . وتسمى صور الشق هذه **خطوط الطيف** وكل من هذه الخطوط هو نتيجة لضوء محدد بعثه المصدر الضوئى . يعطى كل نوع من الذرات خطوط الطيف تكون مميزه لهذا النوع من الذرات . ولا يتيح لنا الضوء الصادر من الذرات حين نلاحظة فى الاسبكتروسكوب أن نعرف نوع الذرات الموجودة فحسب ، ولكنه يفيد بقدر كبير من المعلومات حول تركيب الذرة نفسها وسنقوم بتعقب هذه النقطة الى أبعد من هذا فى فصل تال

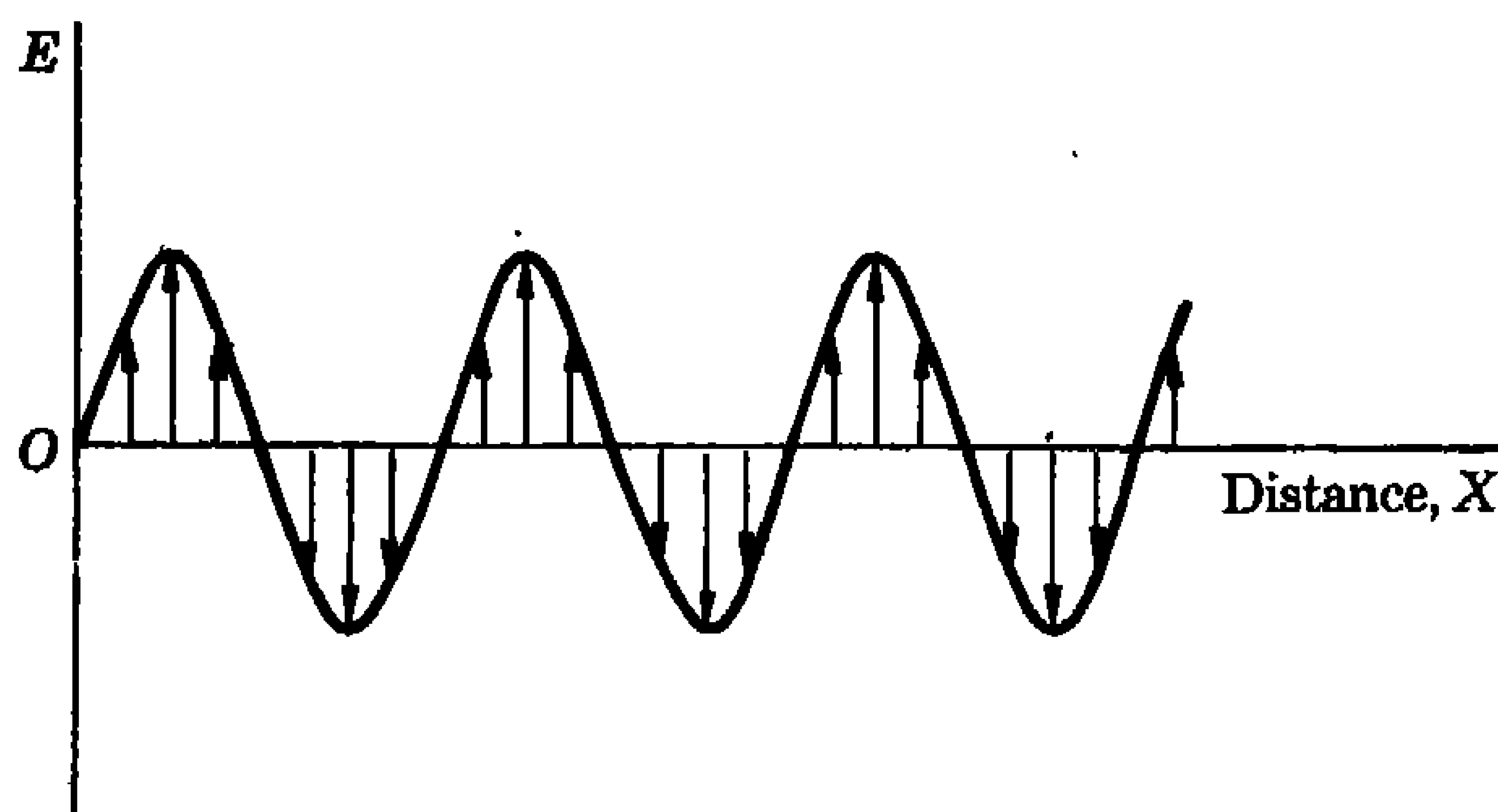


شكل ٢٤ – ١٧
حين يستخدم سبكترومتر لتصوير شق فوتوغرافيا بحيث كان الشق مضاء بقوس زئبقى فان العديد من صور الشق (أو خطوط الطيف) سوف يظهر فى الصورة الفوتوغرافية كما هو مبين هنا .

٢٤ – ٩ الضوء المستقطب

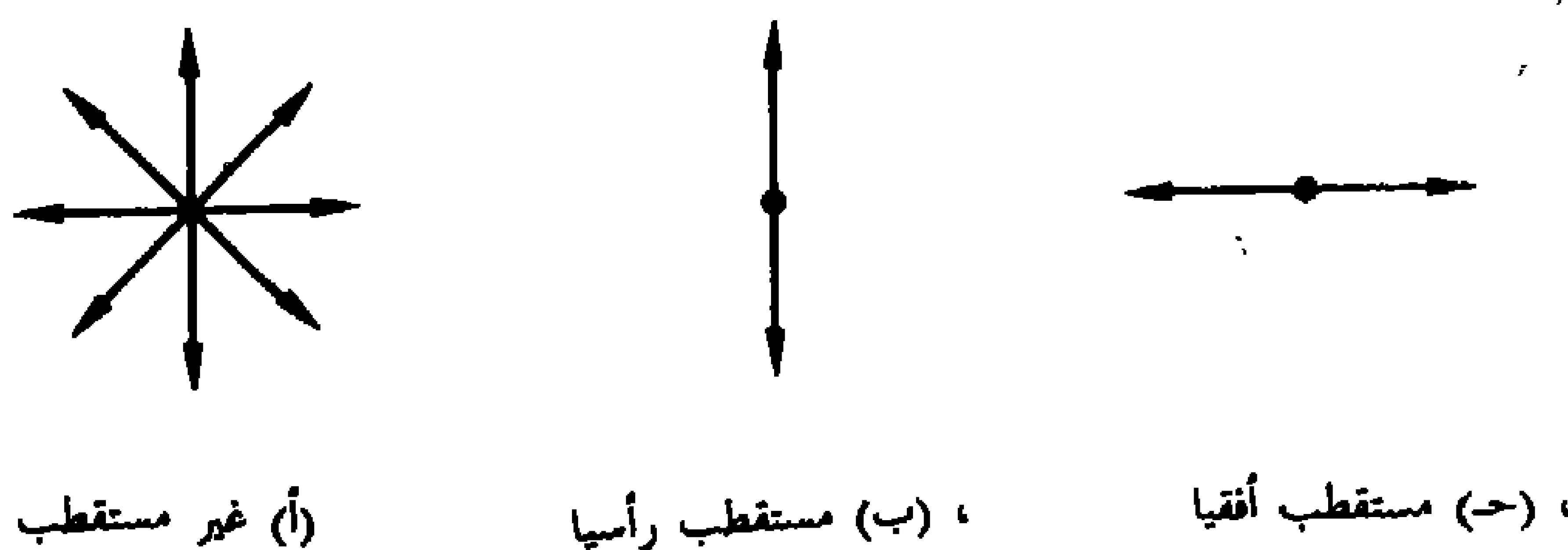
تستفيد كثير من النبيطات الضوئية من حقيقة أن الضوء عبارة عن ذبذبات مستعرضة وهذه الحقيقة ذات أهمية كما سنرى – حين ينفذ الضوء خلال مواد معينة . كما أنها تشكل عاملا هاما عند انعكاس الضوء . وعلى الرغم من أن مناقشتنا السابقة لم تعن بهذه السمة لأمواج الضوء ، إلا أنها سمة أساسية لسلوك الضوء وسنقوم الآن بدراستها .

لقد رأينا فى فصول سابقة أن الضوء هو إشعاع كهرمغناطيسى يتكون من موجات كالتى فى الشكل ٢٤ – ١٨ بحيث يكون متجه المجال الكهربائى جيبيا ومتعامدا مع اتجاه انتشار الموجة كما هو مبين . لو كانت الموجة تنتشر على طول محور X فى الشكل فإن المجال الكهربائى يهتز الى أعلى والى أسفل عند نقطة معينة من الفراغ الذى تنتقل خلاله الموجة . هناك أيضا موجة مجال مغناطيسى متعامدة مع الصفحة وتواكب المجال الكهربائى ويطلق على مثل هذه الموجة **موجة مستقطبة استوائيا** . وقد اشتق هذا الاسم من حقيقة أن المتجة الكهربائى يهتز فى مستوى واحد فقط وهو مستوى الصفحة فى هذه الحالة .



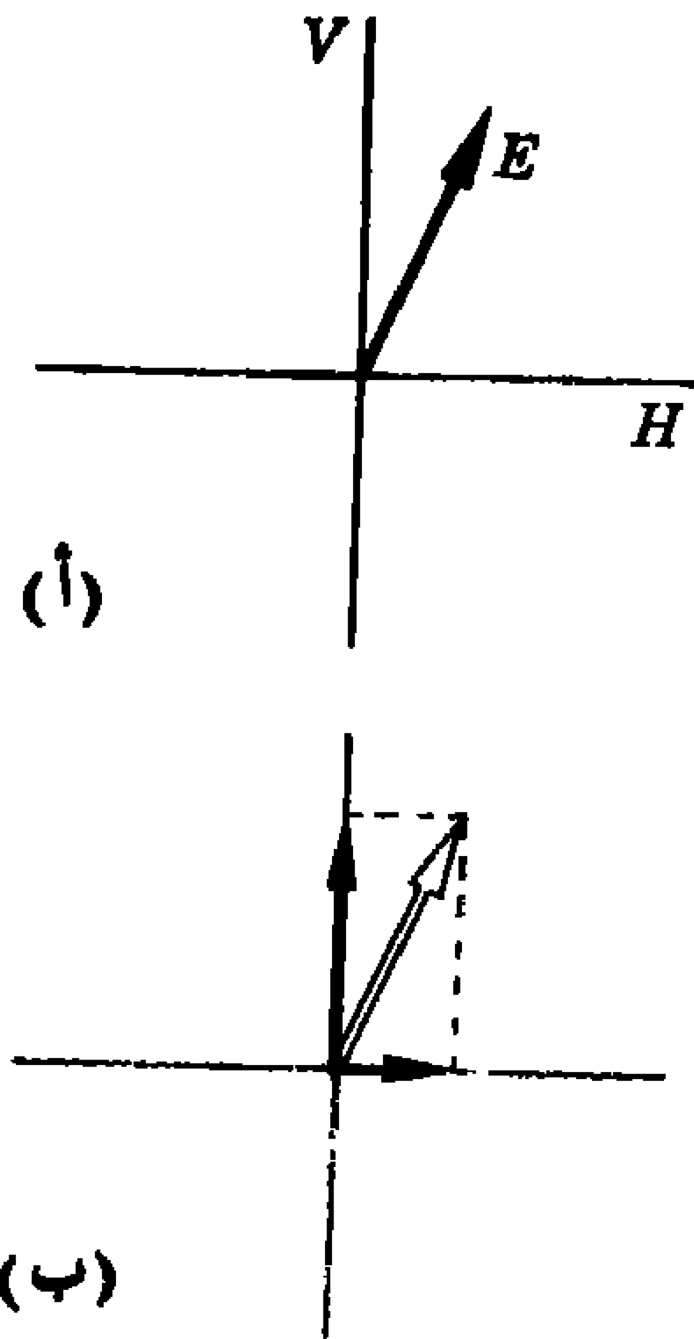
شكل ٢٤ – ١٨
يهتز المتجة الكهربائى فى مستوى واحد حين يكون الشعاع الضوئى مستقطب استوائيا

يتكون معظم الضوء من العدد العديد من الموجات كتلك المبينة فى الشكل ٢٤ – ٨ . لو كان اتجاه الإنتشار الى اليمين فإن المتجهات تهتز جميعا عموديا على محور X كما فى الشكل ٢٤ – ٨ آ على أنهم ليسوا بحاجة لأن يهتزوا فى مستوى الصفحة ، وفى الواقع لا يفعل معظمهم ذلك . لنفترض أننا نقف عند نهاية محور X فى الشكل ٢٤ – ١٨ وأننا ننظر فى اتجاه O أو بمعنى آخر تتجه الموجات الينا رأسا . ويؤدى العدد الهائل من الموجات المقبلة نحونا الى العدد من المتجهات الكهربائية ذات الإتجاهات العشوائية كما فى شكل ٢٤ – ١٩ أ – حيث لم يرسم عدد أكبر من هذا بكثير من المتجهات المبينة . لو أن الأمواج كانت مستقطبة استوائيا فى مستوى رأسى أى فى مستوى الصفحة فى الشكل ٢٤ – ١٨ (أ) لظهرت المتجهات الكهربائية المتقدمة كما هو مبين فى الشكل ٢٤ – ١٩ب . أما لو كانت الموجة مستقطبة استوائيا فى مستوى افقى لبدت المتجهات كما فى الشكل ٢٤ – ١٩حـ .



شكل ٢٤ – ١٩
لو أن حزمة من الأشعة الضوئية تأتى من الصفحة فإن اهتزازا المجال الكهربائى سيكون بالنسبة للانواع الثلاثة من الأشعة كما هو مبين

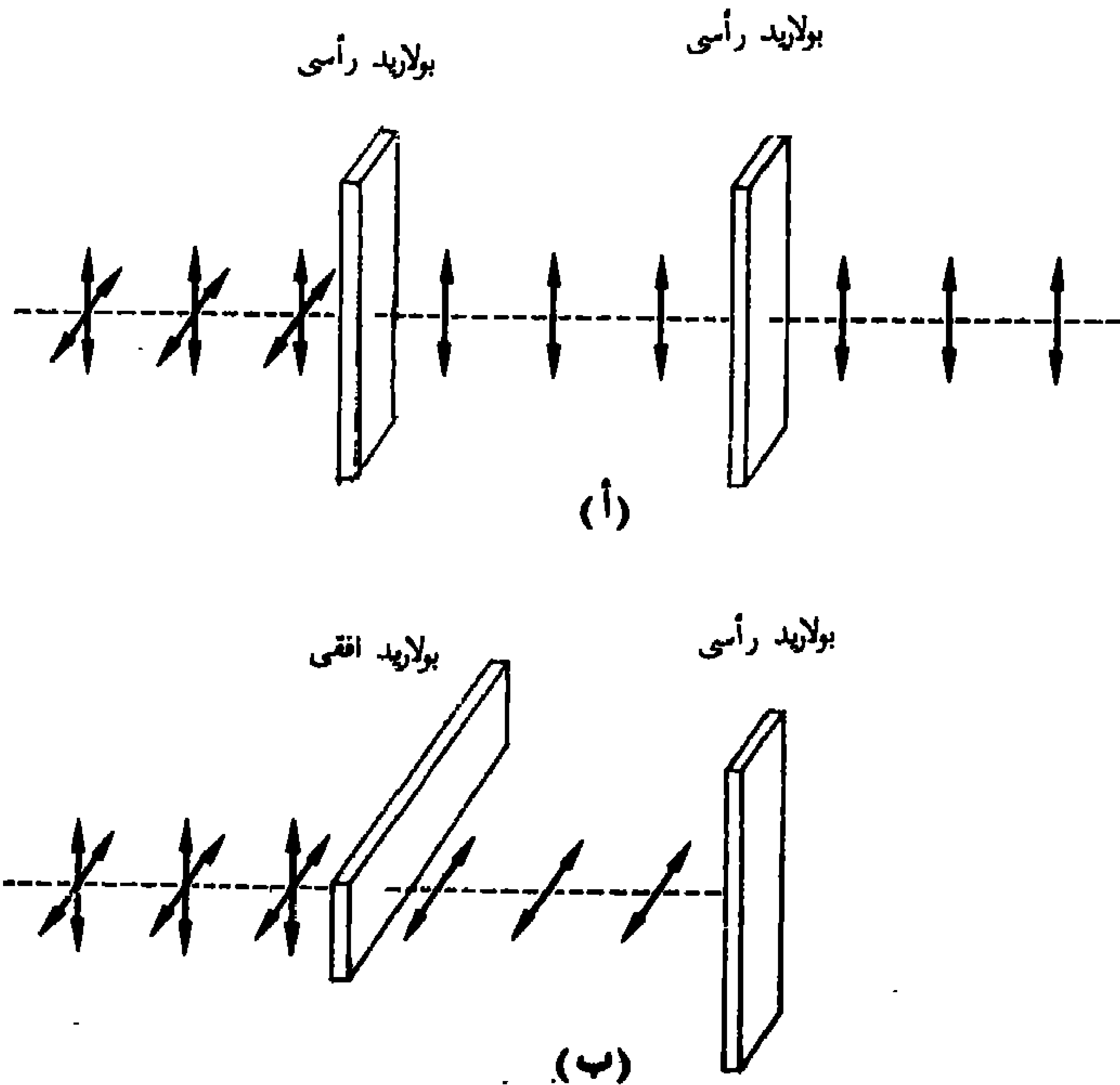
يمكن استقطاب الضوء غير المستقطب استوائيا باستخدام غشاء مستقطب (بولارويد) وهو عبارة عن لوح من البلاستيك الشفاف يحتوى على بللورات إبرية الشكل من مادة كبريتات اليود وكينين،وهذه البللورات مطمورة فى اللوح فى اتجاهات محددة . ولا يسمح هذا اللوح للضوء بالنفاد من خلاله إلا اذا كان المتجة الكهربائى يتذبذب فى اتجاه معين . ومن ثم لو سقط ضوء غير مستقطب على اللوح فإن الضوء النافذ منه سيكون مستقطب استوائيا وسيكون من مجموع مركبات المتجة الكهربائى الموازية للإتجاه المسموح به . (قبل اختراع البولاريد عام ١٩٢٩ كانت هناك طرق أخرى ولكن نظرا لملائمته ورخص ثمنة فإن البولاريد قد حل مكان جميع تلك الطرق فيما عدا فى بعض المواقف الدقيقة جدا) .



شكل ٢٤ - ٢٠
يمكن تحليل متجه المجال الكهربائى الى المركبتين X و y

يمكن أن يعتبر أى متجه على أنه يتكون من مركبتين متعامدتين ومن ثم لو أن المجال الكهربائى كان اتجاهه كما فى الشكل ٢٤ - ٢٠ أ لأمكن تحليله الى مركبتين احداهما رأسية والأخرى أفقية كما فى الشكل ٢٤ - ٢٠ ب . ولو مررنا ضوءا يتذبذب بالزاوية المبينة خلال البولاريد الذى ينفذ فى اتجاه رأسى فقط ، فإن المركبة الرأسية للضوء هى فقط التى ستمر خلاله أما المركبة الأفقية فستتوقف .

لنتدبر ما يحدث لو أن ضوء غير مستقطب مر خلال اثنين من البولاريد كما فى الشكل ٢٤ - ٢١ سيسمح المستقطب (البوريد) الأول فى الجزء (أ) بمرور الذبذبات الرأسية فقط وهذه الذبذبات ستمر خلال المحلل (البولاريد الثانى)



شكل ٢٤ - ٢١
يستقطب الضوء غير المستقطب بواسطة البولاريد الأول ، المستقطب فى الجزء (ب) يكون البولاريد الثانى ، المحلل ، والمستقطب متعامدان ولهذا يوقف الشعاع تماما بواسطة المحلل

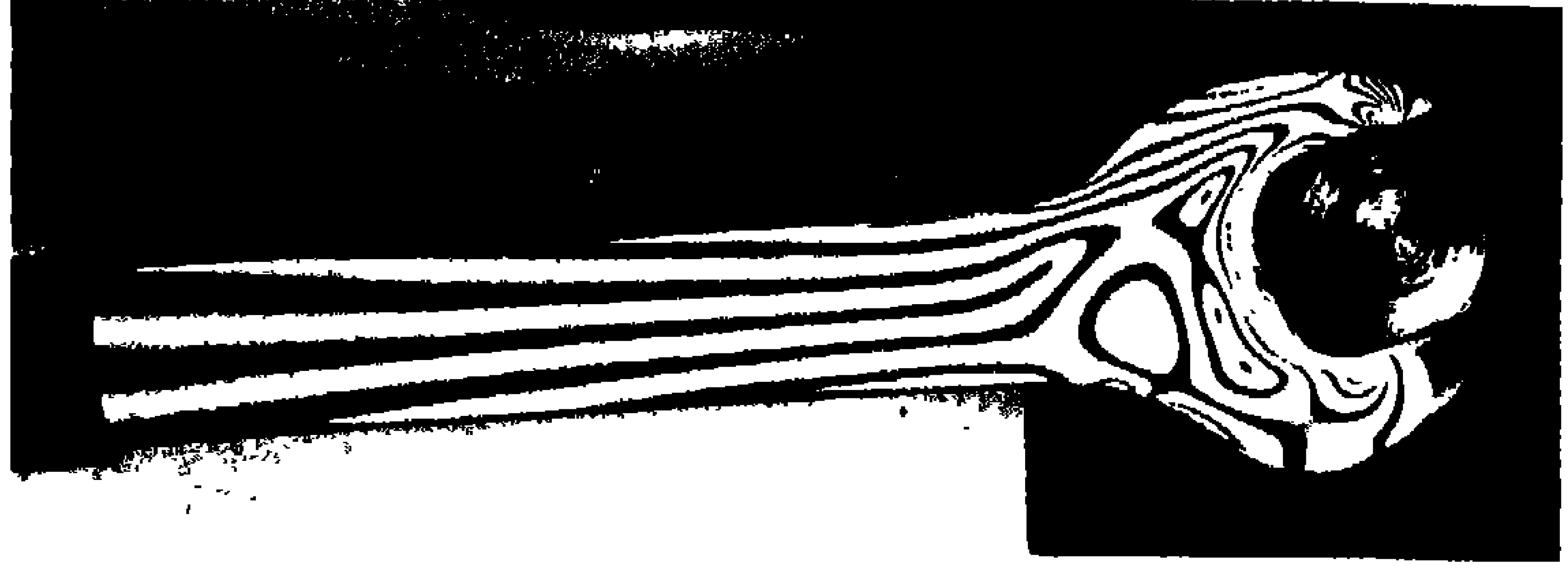
أيضا وذلك لأنه هو الآخر رأسي . ولكن المستقطب فى الجزء (ب) قد أدير خلال 90° بحيث يسمح للذبذبات الأفقية فقط بالمرور ، وهذه الذبذبات ستتوقف تماما بالبولاريد الذى يتجه رأسيا . وعلى هذا (فغالبا) لن يخرج أى ضوء من خلال هذه المجموعة . ويقال فى هذه الحالة الأخيرة أن المحلل والمستقطب **متعامدان** .

يستخدم استقطاب الضوء فى كثير من التطبيقات الصناعية والعلمية . وأحد الاستخدامات هو تعيين تركيز المواد ذات الفاعلية البصرية . **تقوم المواد ذات الفاعلية البصرية** بإدارة مستوى الاستقطاب حين يمر خلالها ضوء مستقطب . فإذا وضع محلول من السكر مثلا بين مستقطب ومحلل متعامدين كما فى الشكل ٢٤ – ٢١ ب ، فإنه يلاحظ أن الضوء لا يتوقف تماما عند المحلل.وعند لف المحلل قليلا بحيث لا يصبح اتجاهه رأسيا نجد أن الضوء قد توقف . لقد أدار محلول السكر الإتجاه الأفقى الأصلى للإستقطاب قليلا نحو الإتجاه الرأسى . وقد وجد أن مقدار دوران مستوى الإستقطاب يعتبر مقياسا مباشرا لتركيز السكر فى المحلول . ومن ثم يمكن قياس تركيز السكر بهذه الطريقة . هناك الكثير من المواد ذات الفاعلية البصرية وتستخدم هذه الفاعلية كمفتاح لتركيب الجزيئات المكونة للمادة . فدوران مستوى الإستقطاب بواسطة الجزيئات أو عدم دورانة يعتمد على الطريقة الدقيقة التى تتواجد بها الذرات فى مواقعها بالنسبة لبعضها البعض فى الجزىء،بل إن بعض أنواع السكر توجد على صورتين الاولى تدير مستوى الإستقطاب الى اليسار والأخرى تديره الى اليمين . كلا النوعين من الجزيئات له نفس التركيب الكيميائى ولكن احدهما يعتبر أيسومير للآخر (مشابة له فى التركيب ومختلف معه فى الخواص) ، ويختلف التركيب فقط فى العلاقات الفراغية عند اثنين أو أكثر من مواقع الروابط الكيميائية المتكافئة داخل الجزىء . هناك الكثير من الأمثلة المبهرة فى الطبيعة على هذه اليمينية واليسارية . فبعض الأنزيمات يستهلك ايسوميرا واحدا لجزىء ما ويزدهر عليه . وهناك أيضا بعض أنواع البروتين التى تتميز بشكل خاص بتركيبها اليمينى واليسارى عند تكوين اشكالها الحلزونية مما يؤثر كثيرا على سلوكها الفيزيائى .

تعريف

كثيرا ما ترى تفاصيل الاشياء تحت الميكروسكوب أكثر وضوحا عندما تفحص بين بولارويدين متعامدين . فأجزاء الجسم التى تبدو هى نفسها فى الضوء الطبيعى قد تتباين بشكل كبير فى قدرتها على تغيير استقطاب الضوء النافذ ، ومن ثم تصبح التفاصيل التى لا يمكن تمييزها بأى طريقة أخرى واضحة ومن السهل رؤيتها . حينما يكون جسم شفاف موجودا تحت إجهاد عال فإنه غالبا مايدير مستوى الاستقطاب للضوء النافذ منه وعلى هذا فإن الجسم الذى يتعرض لإجهادات غير منتظمة سيظهر نطاقات معتمة ومضيئة على التناوب حين يرى بين بولارويدين متعامدين كما فى

الشكل ٢٤ – ٢٢ . وحينما تكون النطاقات متقاربة مع بعضها فإن معنى هذا أن الإجهاد أكثر ما يكون غير منتظم . عند فحص نماذج بلاستكية لأشياء بها انفعالات كالتى فى الشكل ٢٤ – ٢٢ فإنه من الممكن معرفة كيفية توزيع الإجهادات بشكل دقيق . ولهذا الأمر أهمية كبرى عند تصميم الأجزاء المختلفة فى الآلات .



شكل ٢٤ – ٢٢
يظهر الجسم الشفاف الذى به انفعالات نطاقات معتمة ومضيئةعلى التناوب حين يفحص بين بولارويدين متعامدين . ويكون الإجهاد أكبر ما يمكن حين تكون النطاقات أكثر ما تكون تقاربا مع بعضها البعض

قلما ندرك أن الضوء القادم من السماء الزرقاء يكون مستقطبا استوائيا بشكل كبير ولا نتذكر أيضا ان وهج الضوء من على سطح بحيرة أو حائط خرسانى ابيض مستقطب الى حد بعيد . (تشكل هذه الحقيقة الأخيرة الأساس للنظارات الشمسية البولارويدية) . ولما كان التعرف على الضوء المستقطب لايتم الاباستخدام محلل لذا فأعيننا لاتستطيع ادراك وجوده . ولاشك أن موضوع الضوء المستقطب برمته موضوع شيق وقد ترغب فى متابعته بعمق أكبر*

ملخص

تقوم عدسة العين ، فى العين البشرية ، بتركيز الصورة على الشبكية . تستطيع العضلات عن طريق تغيير شكل العدسة أن تحضر صور الأجسام الموجودة على مسافات مختلفة على نفس البؤرة . لايستطيع قصار النظر من الناس أن يركزوا جيدا على الاجسام البعيدة ، فى حين أن طوال النظر لا يستطيعون التركيز على الأجسام القريبة جيدا . تحدث اللااستجمية عندما يكون نظام عدسة العين به تشويه اسطوانى .

لا تتركز الأشعة المارة خلال الاجزاء الخارجية لعدسات كروية شديدة الإنحناء بشكل صحيح . ويسمى هذا العيب الزيغ الكروى . لا تتركز الألوان المختلفة بنفس الدقة بواسطة عدسة ما مما يؤدى الى ظهور الزيغ اللونى .

قوة العدسة مقاسة بالديوبتر هى مقلوب البعد البؤرى مقاسا بالأمتار . حين تكون العدسات على هيئة مجموعات متقاربة فإن قوة المجموعة تساوى مجموع قوى العدسات المنفردة وعلى هذا فان $1/f = 1/f_1 + 1/f_2$

قوة التكبير لنبيطة ضوئية هى النسبة بين الزاوية خلال المقابلة للجسم عند العين المجردة والزاوية حين يرى الجسم النبيطة . تتيح العدسة المكبرة للانسان أن يرى جسما حين يكون هذا الجسم على مسافة اقل من النقطة القريبة للعين وتكون قوة تكبيرها التقريبية $(25\ \text{cm})/f$.

فى الميكرسكوب البسيط ، تكون العدسة الشيئية صورة حقيقية للجسم ثم ترى هذه الصورة بواسطة العدسة العينية التى تعمل كمكبر .

---

* هناك كتيب عن هذا الموضوع فى سلسلة Momentum Book بعنوان Polorized hight ومن تأليف W.A. Shurcliff and S.S. Ballard الناشر هو Prineceton, N.J. 1965

تبلغ قوة التكبير لمثل هذا الميكروسكوب $[(18\ cm)/f_0]\cdot[(25\ cm)/f_e]$ وفى الميكروسكوبات الجيدة تكون كل من العدستين ، فى الواقع ، مجموعة مركبة من العدسات .

يقوم الاسيكتروسكوب المنشورى بفصل شعاع من الضوء الى مكوناتة من الأطوال الموجية (أو الألوان) فتتكون صورة لمدخل الشق لكل طول موجى وتسمى كل صورة بخط من خطوط الطيف وتمثل طولا موجيا محددا فى شعاع الضوء الأصلى .

يكون الضوء فى شعاع ما غير مستقطب عادة ، أى أن متجهه الكهربائى يهتز بصورة مركبة عند كل الزوايا الممكنة عموديا على اتجاه الشعاع . حينما يمر الضوء غير المستقطب خلال بولارويد فإن الذبذبات التى تحدث فى اتجاه واحد فقط هى التى تمر ويسمى هذا الشعاع النافذ – الذى يهتز فيه المتجة الكهربائى دائما فى نفس الإتجاه – شعاعا مستقطبا . تملك المواد ذات الفاعلية البصرية – القدرة على تغيير اتجاه استقطاب شعاع ما حين يمر هذا الشعاع من خلالها .

الحد الادنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن ترسم الملامح الرئيسية للعين وأن تشرح وظيفة كل منها .

٢ – أن تشرح ما المقصود بقصر النظر (myopia) وطول النظر (**hyperopia**) ولا استجمية (**astigmatism**) وكذا فقد القدرة على التكيف . أن تذكر كيف يمكن علاج كل من هذه العيوب باستعمال العدسات . ان تحل مسائل شبيهة بالأمثلة التوضيحية ٢٤ – ١ و ٢٤ – ٢ .

٣ – أن ترسم تركيب آلة التصوير البسيطة وأن تشرح كيف يتم تركيز الصورة فى آلة التصوير ذات العدسة المتحركة .

٤ – أن تعطى معنى الزيغ الكروى والزيغ اللونى .

٥ – أن تعرف وحدة ديوبتر . أن توجد البعد البؤرى لعدة عدسات رقيقة على شكل مجموعة متقاربة .

٦ – أن تشرح عمل عدسة التكبير وبالإشارة اليها أن تعطى معنى قوة التكبير . أن تذكر قوة التكبير التقريبية لعدسة مجمعة معينة .

٧ – أن توضح كيف يعمل الميكرسكوب ذو العدستين وذلك برسم نظامه البصرى وكذا مسار الشعاع له . أن تميز بين العدسة الشيئية والعدسة العينية .

٨ – أن ترسم النظام البصرى لتلسكوب فلكى وأن تحدد موقع الصورة التى ينتجها .

٩– أن تشرح ما المقصود باسبكتروسكوب منشورى وأن توضح كيف يقوم بإنتاج صور خطية . أن تصف كيف يفصل الألوان بتحليل شعاع من الضوء .

١٠ – ان تميز بين الضوء غير المستقطب والضوء المستقطب . أن تشرح كيف يمكن انتاج ضوء مستقطب . أن تعرف المصطلحات التالية : بولارويد ، بولارويدان متعامدان ، المواد ذات الفاعلية البصرية .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

أجزاء العين ، الحدقة ، إنسان العين ، القرنية ، العدسة ، الشبكية .

قصر النظر ، طول النظر ، اللااستجمية ، فقدان القدرة على التكيف .

النقطة القريبة ، النقطة البعيدة

الزيغ الكروى ، والزيغ اللونى .

قوة عدسة مابالديوبتر

قوة التكبير

الشيئية ، العينية

سبكتروسكوب منشورى ، خط الطيف

الضوء المستقطب فى مقابل غير المستقطب ، مستوى الاستقطاب .
بولاوريدا متعامدان ، مواد ذات فاعلية بصرية .

أسئلة وتخمينات

١ - إثبت أن الصورة التى تتكون بواسطة عدسة مجمعة لرجل ما تكون مقلوبة ولكن هذا الرجل وصورته سيكون لهما نفس اليد اليمنى . إثبت أن العكس تماما هو الذى يحدث عند استخدام مرآة مستوية .

٢ - تنتج صور أوضح فى الأجهزة البصرية فقط عندما تستخدم أجزاء صغيرة من العدسة . وفى حالة آلة التصوير ذات الثقب لا حاجة بها لعدسة ، لتوضيح إمكانية هذا إرسم جسما صغيرا مضيئا ارتفاعة حوالى 1 mm ويقع على بعد 10 cm من فتحة قدرها 1 cm موجودة فى حائل ضخم معتم . **بين كيف أن البقعة المضيئة التى يسببها الجسم على ساتر يقع خلف الفتحة بمقدار 5 cm** تتضاءل فى الحجم كلما كانت الفتحة أضيق . بين انه فى الحالة القصوى حين تصير الفتحة كثقب الابرة فان جسمين يبعدان عن بعضهما 1 cm ويقع كل منهما على بعد 10 cm من الفتحة سيؤديان الى صور محدة المعالم على الساتر .

٣ - بين لماذا يؤدى ثقب صغير موضوع أمام عدسة الى صورة جيدة حتى لو لم تكن الصورة فى البؤرة تماما .
(ارجع الى السؤال ٢)

٤ - على الرغم من أن كل الآت التصوير ذات 35 mm تبدو متشابهة إلا أن أثمانها تتراوح بين 20 $ الى عدة مئات من الدولارات مع العلم بأنها جميعا تحتوى على نفس الملحقات . ما هى أوجه اختلاف هذه الالآت ؟

٥ - يحرف منشور زجاجى شعاعا من الضوء الازرق اكثر مما يحرف شعاعا احمر الى حد ما . بين بواسطة صدور الموجة كيف تقودنا هذه الحقيقة الى استنتاج ان الضوء الاحمر ينتقل بسرعة اكبر خلال الزجاج .

٦ - أى هذه الالآت - حين يستعمل بطريقة عادية - يكون صورا حقيقية : (أ) العين ، (ب) آلة التصوير ، (حـ) الميكروسكوب ، (د) التلسكوب الأرضى (هـ) منظار ثنائى العينية ، (و) فانوس الإسقاط ، (ز) المرآة المستوية ، (ح) مرآة الحلاقة المقعرة ، (ط) مرآة المكشاف الضوئى ؟

٧ - تسمى الأطوال الموجية للضوء الصادر من بخار الزئبق الساخن خطوط الطيف . إشرح بوضوح لماذا تسمى خطوطا .

٨ - يمكن للإنسان أن يشترى ميكروسكوبا رخيصا لكى يستعملة الاطفال ، ولكن الصور التى ترى بهذا الميكروسكوب تكون دائما وأبدا ذات حواف ملونة . لماذا ؟

٩ - افترض أن آلة تصوير صندوقية قد ملئت بالماء وأن عدستها قد جعلت أقوى بحيث تتكون الصورة فى نفس موقعها من الفيلم . هل يمكن أن تتغير الصور التى تلتقط بهذه الآلة على أى نحو ؟ كرر المسألة لو أن لدينا صندوقا ذا ثقب ضيق وليس عدسة .

١٠ - لماذا كانت « سرعة » آلة التصوير هامة . ماهى عوامل التصميم المختلفة التى تؤثر على السرعة ؟ (اعتبر كلا من سرعة القفل وسرعة العدسة)

١١ - ماذا يحدث للطاقة الضوئية التى لا تنفذ من البولارويد حين يسقط عليه ضوء غير مستقطب ؟ هل يمكنك أن تفكر فى العيوب التى تظهر نتيجة لهذا عند استخدام البولارويد ؟

١٢ - كيف يمكن تحديد ما إذا كان شعاع من الضوء مستقطب أم لا ؟ وما اذا كان مكونا من شعاعين أحدهما مستقطب والآخر غير ذلك .

١٣ - عند استخدام آلة تصوير تجارية قطر فتحة عدستها 5 mm وهو ما يسمى قطر الفتحة ، وجد أن الزمن المناسب للتعريض كان 1/60 s ما هو الزمن التقريبى للتعويض حين تستخدم آلة تصوير ذات ثقب قطره 0.5 mm وبها فيلم من نفس النوع : (ق) .

١٤ -أتيحت لك أنبوبة بريد اسطوانية طويلة مصنوعة من الورق المقوى وعدستان بعداهما البؤريان 60 cm و 10 cm يمكن تثبيتهما فى الأنبوبة . استخدم هذه الاشياء فى تصميم تلسكوب لعبة .

مسائل

١ – (أ) عندما يضبط نظام العين – العدسة ليرى جسما بعيدا فما هو البعد البؤرى للعدسة ؟ افترض أن المسافة بين عدسة العين والشبكية هى 2.0 cm . (ب) كرر المسألة حين يكون الجسم المراد رؤيته يقع عند النقطة القريبة أى على بعد 25 cm من العين .

٢ – جسم طوله 0.01 cm يرى بالعين المجردة عندما يكون عند النقطة القريبة لها ، أى 25 cm ما هو طول الصورة المتكونة على الشبكية ؟ (باعتبار أن المسافة بين عدسة العين والشبكية هى 1.0 cm) كرر المسألة عند استعمال عدسة مكبرة بعدها البؤرى 5.0 cm بحيث وضع الجسم قريبا من نقطتها البؤرية .

٣ – تستطيع سيدة أن ترى الكتابة بوضوح حين يكون الكتاب على بعد 60 cm وليس أقرب من ذلك من عينها (أ) هل هى قصيرة النظر أم طويلته ؟ (ب) ما هو نوع العدسة وبعدها البؤرى والتى يجب عليها استعمالها لتصحيح نظرها ؟

٤ – لا يستطيع شخص ما أن يرى الأجسام بوضوح اذا لم تكن أقرب من حوالى 150 cm (أ) هل هو قصير النظر أم طويله ؟ (ب) ما هو نوع العدسة وبعدها البؤرى والتى يجب عليه استعمالها ليصحح نظره ؟

٥* – ترتدى فتاة صغيرة نظارة ذات عدسات سميكة أشبة بالعدسات المكبرة . حين أمسك اخوها بهذه النظارة فى الشمس ليحصل بها على صور وجد أن كل عدسة تعطى صورة للشمس على بعد 30 cm من العدسة . ما هى النقطة القريبة والنقطة البعيدة المحتملين بالنسبة للفتاة بدون استعمال النظارة . ؟

٦ – لاحظ مدرس أحد الأطفال فى الفصل يمسك الصفحات قريبا جدا من عينيه عند القراءة . والوضع العادى لهذا الطفل كان 11.0cm (أ) الطفل قصير النظر ام طويله ؟ (ب) ما هو نوع العدسة وبعدها البؤرى والتى يجب على الطفل استعمالها فى نظارته ؟

٧ – وجد أحد أخصائى قياس البصر أن الشخص الذى يقوم بفحصه يستطيع أن يرى أحسن ما يمكن حين يثبت أمام عينية مجموعة مكونة من ثلاث عدسات الواحدة وراء الأخرى وأبعادها البؤرية هى 20 cm و 50 cm و 100 cm- ما هو البعد البؤرى الذى يجب وضعه للشخص ؟

٨ – لو أن المسافة بين العدسة والفيلم كانت 10.0 cm فى آلة تصوير ذات عدسة واحدة ولو أنها تلتقط صورا مساحتها 8×6 cm فما هى المسافة التى يجب وضع آلة التصوير عندها لكى تلتقط صورة لوحة مساحتها $100\ cm^2$ بحيث تنضبط اللوحه داخل الصورة تماما ؟

٩ – عند استخدام آلة التصوير التى ذكرت فى المسألة 8 لتصوير شجرة من مسافة 40 m فإن صورة الشجرة يكون طولها 2.0 cm ما هو ارتفاع الشجرة ؟

١٠ – فى آلة تصوير صندوقية بسيطة كانت المسافة بين العدسة والفيلم هى 10 cm. لو أن البعد البؤرى للعدسة كان 9.5 cm فأين يجب وضع جسم ما للحصول على أحسن صورة له على الفيلم ؟

١١ – اوجد (أ) القوة (ب) البعد البؤرى للعدسات التالية حين توضع لتكوين مجموعة مقاربة

$f_1 = 20$ cm, $f_2 = -60$ cm, $f_3 = 40$ cm

١٢ – ما هو البعد البؤرى لعدسة يلزم أن تكون ملاصقة تماما لعدسة مجمعة 50 cm حتى تكونا معا عدسة مفرقة بعدها البؤرى 100 cm

١٤ – فى ميكروسكوب بسيط ، كان البعد البؤرى للشيئية 3 cm بينما كان البعد البؤرى للعينية 5 cm ما هى قوة تكبير الميكروسكوب ؟

١٥* – صنع صبى ميكروسكوبا بسيطا بتثبيت عدسة بعدها البؤرى 5 cm عند طرف أنبوبة طولها 10 cm وتثبيت عدسة أخرى بعدها البؤرى 3.0 cm عند الطرف الآخر للأنبوبة . (أ) إذا استخدم العدسة ذات 3.0 cm كعدسة عينية فأين بالتقريب يجب علية وضع العينية التى يفحصها أمام الشيئية (ب) ما هى بالتقريب قوة تكبير هذا الميكروسكوب ؟

١٦ – ما هى قوة تكبير التلسكوب الفلكى الذى تبلغ قوة عدسته الشيئية 1.5 diopter وعدستة العينة 20 diopter

١٧ – يبلغ البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى تلسكوب بمرصد « يركز » حوالى 19 m ،عند رصد القمر ما هو عدد الكيلومترات على سطح القمر التى تناظر طولا قدره 1.0 cm على الصورة التى تكونها العدسة الشيئية ؟ (المسافة الى القمر = 3.8×10^8 m

١٨ – (أ) كم مرة يجب أن تزيد شدة الإستضاءة فى تلسكوب اذا تغير قطر العدسة الشيئية من 0.5 cm الى 4.0 cm (افترض أن الأبعاد الأخرى ظلت ثابتة) . افترض الآن – كبديل – أن البعد البؤرى للشيئية قد ضوعف ثلاث مرات عند الإنتقال من العدسة الصغيرة الى العدسة الكبيرة ، (ب) كم عدد المرات التى تتغير بها شدة الإستضاءة عند نقطة معينة بالصورة ؟

١٩** – اعتبر زاوية رأس المنشور أو الزاوية عند قمة المنشور مساوية $60°$ فى الشكل ٢٤ – ١٤ . إذا كانت $n = 1.50$ وكانت زاوية السقوط $53°$ فاوجد (أ) الزاوية التى يغادر بها الشعاع المنشور ، (ب) زاوية الانحراف D

٢٠* – يحتوى جهاز ما على عدسة بعدها البؤرى 48 cm ومصنوعة من زجاج معامل انكساره $n = 1.50$ ولكى تبرد العدسة وجد أنه من المفيد غمر الجزء المحتوى على العدسة فى وعاء على شكل متوازى مستطيلات به ماء – ما هو البعد البؤرى لعدسة من نفس نوع الزجاج يجب لصقها مع العدسة الأولى حتي يعمل الجهاز بشكل صحيح ؟

الفصل الخامس والعشرون

التداخل والحيود

ناقشنا فى الفصلين الأخيرين سلوك العدسات والمرايا باستخدام مفهوم الأشعة الضوئية . وفى هذه المناقشات لم نكن فى حاجة الى معرفة ما إذا كان الضوء يتكون من جسيمات أو موجات . ولكن هذا ليس صحيحا بالنسبة للموضوعات التى سوف نعالجها فى هذا الفصل . وسنرى أن طبيعة الضوء تسبب ظواهر تداخل تشبه فى نواح كثيرة ظواهر التداخل التى قابلناها فى دراستنا للحركة الموجية والصوت . وقد أدى مجرد وجود هذه الظواهر ، وكذلك بعض الظواهر الاخرى التى سوف نناقشها فى هذا الفصل الى قبول الطبيعة الموجية للضوء بشكل نهائى كما سوف نرى .

٢٥ - ١ الحيود

تستطيع الموجات أن تنحنى حول الأركان ، وتسمى هذه الظاهرة **بالحيود** . ويمكن توضيح هذه الحقيقة بصريا بسهولة باستخدام موجات الماء كما هو مبين فى الشكل ٢٥ - ١ . لاحظ كيف تمر الموجات خلال الفتحة الموجودة فى الحاجز ثم تنتشر فى كل المنطقة الواقعة خلفه . ويشاهد مثل هذا الموقف فى حالة الموجات الصوتية التى تستطيع أيضا أن تنحنى حول الأركان . وبالمثل فإن الموجات الكهرمغناطيسية يمكنها أن تنتشر فى المنطقة الواقعة خلف عائق . وسوف نرى مؤخرا فى هذا الفصل أن الضوء يمتاز بنفس هذه الخاصية .

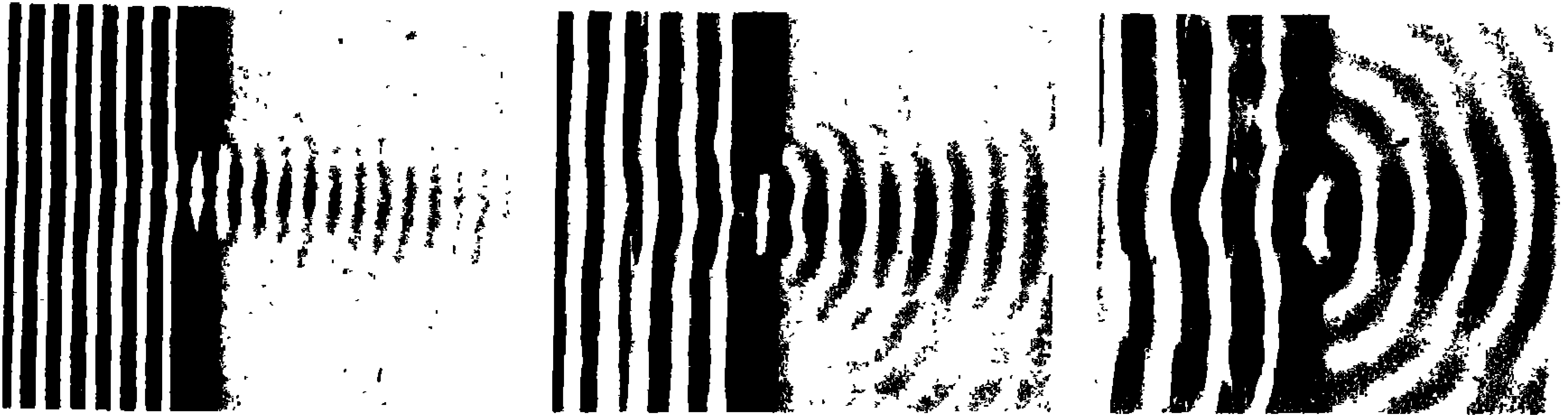
والمبدأ الأساسى لظاهرة الحيود هو حقيقة أن الموجات يمكن أن تتداخل كل منها مع الأخرى . ولكى نعد أنفسنا لمناقشة الحيود بأسلوب موضوعى سوف ندرس أولا كيف تتداخل الموجات .

٢٥ - ٢ تداخل الموجات

قد تذكر أننا قد أثبتنا عند دراستنا للموجات الصوتية أن من الممكن أن نجعلها تتداخل كل منها مع الأخرى . وعلى وجه التخصيص يمكننا تقسيم شعاع واحد من الموجات الصوتية الى نصفين وذلك بإرسال كل منهما فى واحدة من أنبوبتين . وإذا اتحدت هاتان الموجتان مرة أخرى فإنها قد تقوى أو تلاشى كل منها الأخرى ، ويعتمد ذلك على الطول النسبى للأنبوبتين .

لنفرض أن لدينا مصدرين للموجات عند النقطتين A و B فى الشكل ٢٥ - ٢ أ ، وأن هذين المصدرين يبعثان موجات متماثلة (ومتماسكة)* . وعمليا يمكننا استخدام الموجات المنبعثة من مصدر واحد وتقسيمها الى جزئين لكى نتأكد أن

شكل (٢٥ - ١)
تسقط موجات الماء على ...تحة من اليسار . لاحظ الموجات تنتشر من الفتحة المنطقة الواقعة أيمن الفتحة ...نها تنتشر فى جميع ...تجاهات تملأ كل هذه ...طقة إذا كان الطول الموجى ...ارنا بحجم الفتحة .

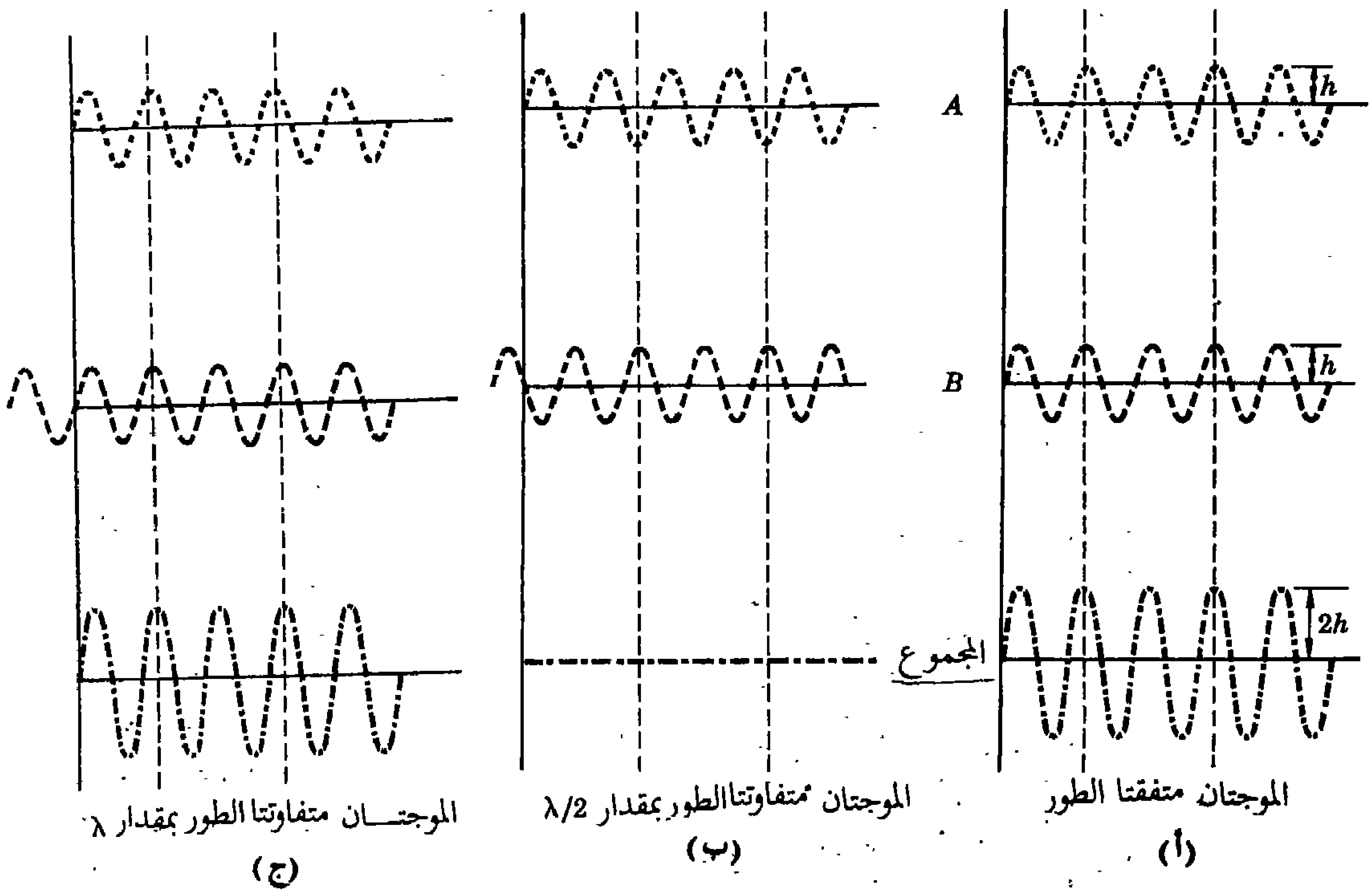


* انظر الجزء (٢٧ - ١٣) لمناقشات أخرى عن التماسك

الموجات متماثلة فى الشكل . ومن الواضح أنه إذا اتحدت الموجتان A و B فى الشكل ٢٥ - ٢أ سويا فإنهما سوف تقوى كل منهما الأخرى لأنهما متفقتا الطور . وفى هذه الحالة تجمع قمم الموجة A على قمم الموجة B منتجة قمما كبيرة كما هو مبين بالنسبة الى « مجموع الموجة فى الجزء أ . وتسمى هذه الحالة التى تجمعت فيها موجتان بحيث تقوى كل منهما الأخرى **بالتداخل البناء** .

واذا حركنا المصدر B الى الخلف مسافة نصف طول موجى كما هو مبين فى الشكل ٢٥ - ٢ ب فإننا سنرى أن الموقف مختلف تماما . والآن اذا جمعنا الموجتين فإن قمة الموجة A سوف تجمع على قرار الموجة B . نتيجة لذلك فإن الموجتين A و B سوف تلاشى كل منهما الأخرى اذا كانتا أصلا متساويتين فى المقدار . ويوضح الجزء ب مجموع هاتين الموجتين المتفاوتتى الطور بمقدار 180° أو $\lambda/2$.

شكل (٢٥ - ٢)
تستطيع الموجات المتماثلة أن تقوى أو تلاشى كل منها الأخرى ويعتمد ذلك على أطوارها النسبية .



وكما نرى فإن مجموع الموجتين يساوى صفرا ، وهذه هى حالة **التداخل (الإتلاف) الكلى** . وفى التداخل الإتلافى تلاشى كل من الموجتين الأخرى تماما عندما يجمعان معا .

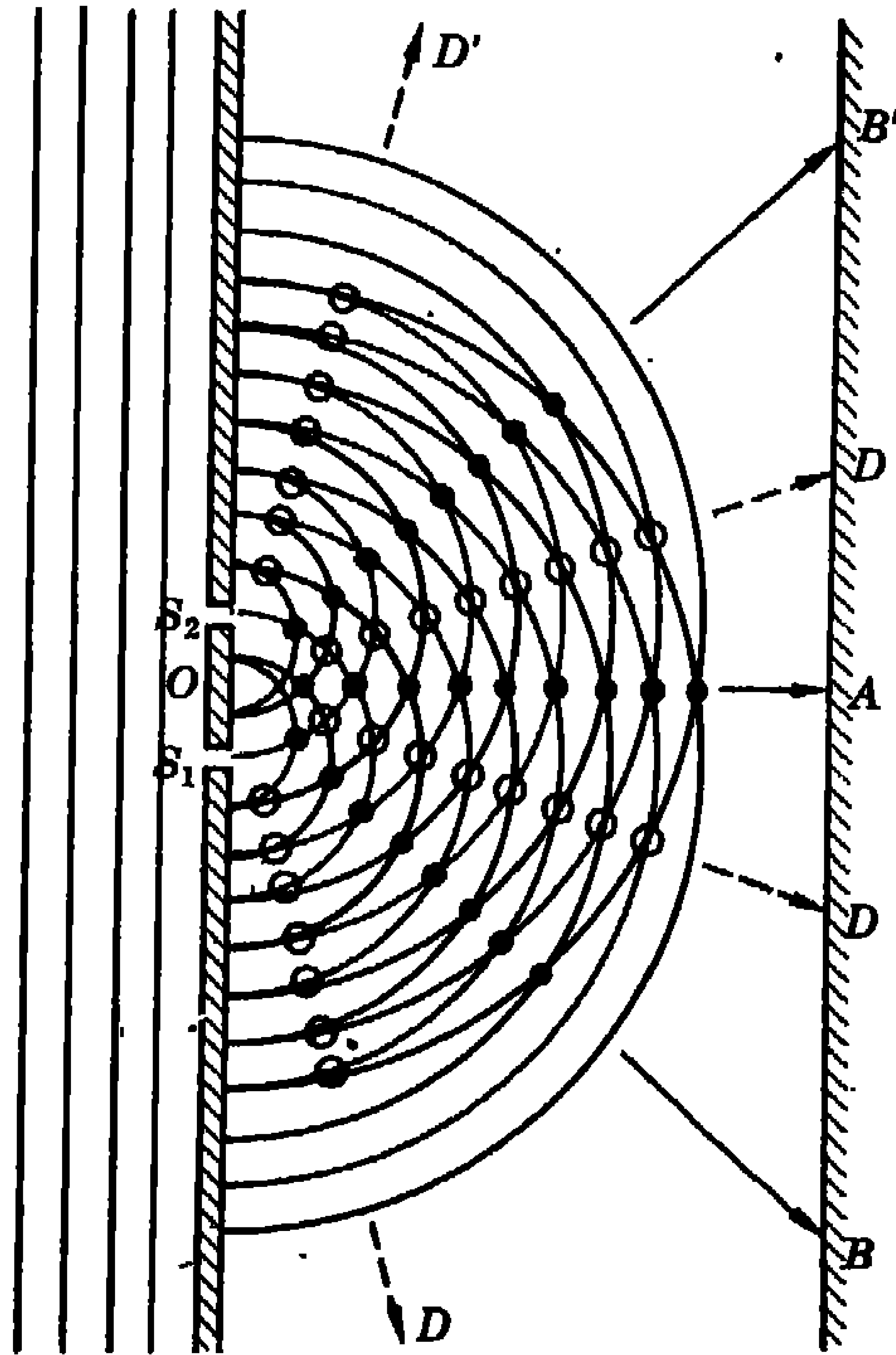
واذا أرجعنا الموجة B الى الخلف بمقدار نصف طول موجى آخر فانها ستكون متأخرة عن الموجة A بمقدار 360° أو طول موجى كامل كما هو مبين فى الشكل

٢٥ — ٢ حـ . وهنا تتحد الموجتان تماما فى الخطوة مرة ثانية ، بحيث اذا جمعتا سويا فإنهما سوف تقويان كل منهما الأخرى كما هو مبين فى الجزء حـ . من هذا التحليل يتضح لنا أن الموجات المتفاوتة الطور بمقدار $0°$ ، $360°$ ، $(2)(360°)$ ... الخ تميل الى أن تقوى كل منهما الأخرى . أو ، كما ينص عادة ، اذا كان فرق المسار) بين الموجات يساوى 0 ، λ ، 2λ ، 3λ .. الخ فإنها تقوى كل منها الأخرى .

بالمثل ، يحدث الموقف المبين فى الجزء ب من الشكل إذا كانت الموجة B متأخرة عن الموجة A بمقدار $\lambda + \frac{1}{2}\lambda$. ويحدث التلاشى إذا كان فرق المسار يساوى $n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$ حيث ... $n = 1,2,3$. وهذا يعنى أن التداخل الإتلافى يحدث إذا كان فرق المسار هو $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2$ ، .... الخ

يمثل الشكل ٢٥ — ٣ رسما تخطيطيا لتجربة بسيطة توضح تداخل موجات الماء . وفى هذه التجربة تسقط موجات الماء المستوية على الحائط من اليسار ، ويسمح الشقان S_1 و S_2 الموجودان بالحائط للموجات بالمرور خلالها عند هاتين النقطتين .

وعليه فإن الشقين يعملان كمصدرين جديدين للموجات بالنسبة للمنطقة التى تقع على يمين الحائط . ويلاحظ أن هذين المصدرين يولدان موجتين مترابطتين لأنهما



شكل (٢٥ — ٣)
تسقط الموجات المستوية على الشقين من اليسار . وتمثل قمم الموجات بالنقط الداكنة، بينما تمثل بطونها بالنقط الفاتحة ويبعث هذان الشقان بقمم موجات جديدة كما هو مبين . وتقوى الموجتان كل منهما الأخرى على طول الخطوط المارة بالنقط المصمتة ، بينما تلاشى كل منهما الأخرى على طول الخطوط المارة بالنقط المفتوحة .

تنتجان من نفس الموجة الساقطه وتمثل بعض قمم الموجات الدائرية المنبعثة من S_1 و S_2 فى الشكل باللون الأسود

لاحظ أن قمم الموجات المنبعثة من المصدرين متفقة الطور وتقوى كل منها الأخرى عند النقط الداكنة المبينة على الخطوط OA ، OB ، OB' .. الخ فى الشكل ٢٥ – ٣ وتوجد قرارات الموجات فى منتصف المسافة بين كل قمتين متتاليتين ، وهى أيضا تقوى كل منهما الأخرى على نفس الخطوط عند النقط الموضحة بالنقط الفاتحة فى الشكل ٢٥ – ٣ وكما نرى تتداخل الموجتان المنبعثتان من المصدرين سويا تداخلا بناءا على الخطوط OA ، OB ، OB' ... الخ . ولهذا فإن سعة الموجات التى تصطدم مع الحائط الايمن عند النقط A ، B ، B' .. الخ تكون كبيرة سوف تكون هذه النقط مناظرة لبطون الموجات .

وعند فحص الشكل ٢٥ – ٣ بتفصيل أكثر سنرى أن الموجتين تلاشى كل منهما الاخرى عند نقط معينة تقع على الخطين OD ، OD' . وعند مواضع الدوائر المفتوحة تلتقى قمة من أحد المصدرين مع قرار من المصدر الآخر وتلاشى كل منهما الأخرى . وحيث أن إزاحة سطح الماء على الخطين OD و OD' تساوى صفرا ، فإن نقطتى تقاطع هذين الخطين مع الحائط الأيمن هما عقدتان . لذلك لن توجد أية حركة موجية عند النقط المرموز لها بالرمز D ، ومن السهل إثبات أن هذه النقط هى دائما نقط حركة صفرية (هل يمكنك أن تبرهن هذه الحقيقة ؟) .

شكل (٢٥ – ٤)
يبعث المصدران بموجات ماء مترابطة تشبة كثيرا تلك الموجات المنبعثة من الشقين فى الشكل ٢٥ – ٣٠

"PSSC Physics," 3d ed., D.C. Heath and Company, 1965.)



لإثبات هذا السلوك بطريقة أوضح من ذلك تأمل التجربة المبينة فى الشكل ٢٥ – ٤ . وفى هذه التجربة تنبعث موجات الماء من مصدرين مترابطين ، ويحدث هذا بواسطة الشقين S_1 و S_2 . وكما نرى من الشكل ، تؤدى هاتان المجموعتان من الموجات الى ظهور مناطق اضطراب كبير واضطراب صغير على سطح الماء .

٢٥ – ٣ تجربة الشق المزدوج ليونج

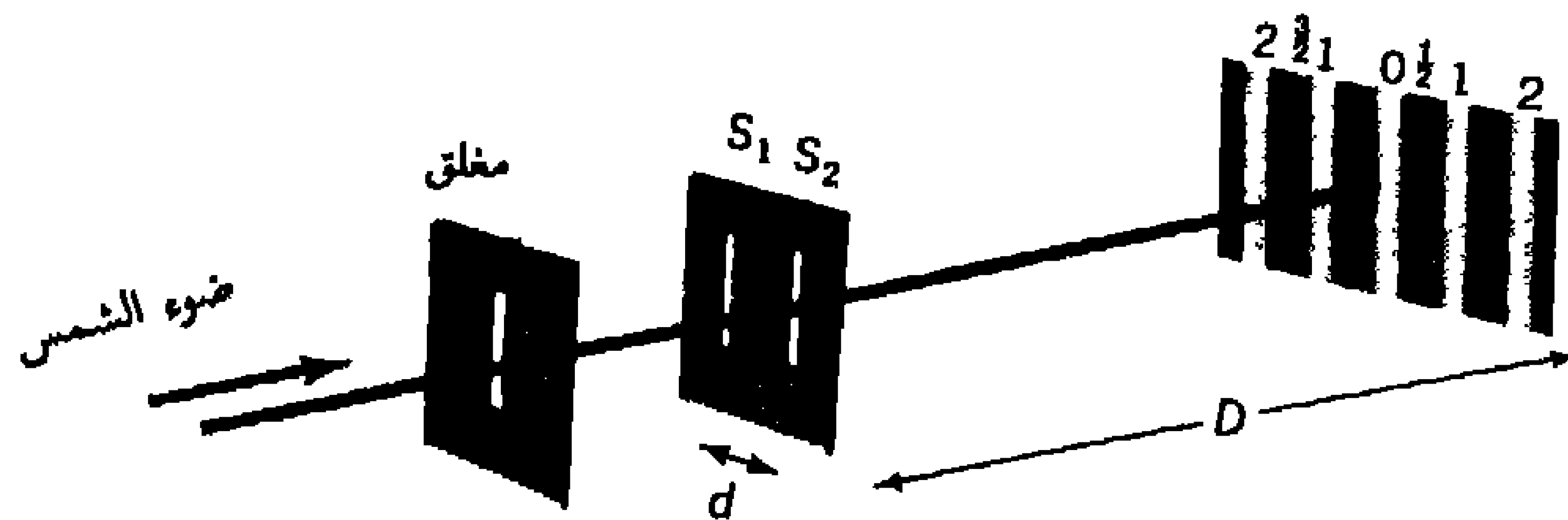
ليست التجربة التى وضعت فى الجزء السابق ، والتى تبحث فى تداخل الموجات المترابطة المنبعثة من شقين ، خاصة بموجات الماء فقط . ومن الضرورى هنا أن نتذكر أن شعبتى الشوكة الرنانة يمكنها أن تحدث تداخل الموجات الصوتية . ويمكن تفسير هذه الظاهرة بطريقة مشابهة لوصف موجات الماء المتداخلة ، باستثناء أن الموجات فى هذه الحالة هى الموجات الصوتية التضاغطية وليست موجات الماء المستعرضة . ومن الضرورى أن يكون واضحا أن أية مجموعة مترابطه من الموجات يمكنها أن تصور ظواهر التداخل .

وكما ذكرنا سابقا ، كان نيوتن يعتقد أن الضوء ذو طبيعة جسيمية . وقد صور الضوء على أنه تيارا من الجسيمات المنطلقة من المصادر الضوئية . وبالطبع فإن هذه الجسيمات تسير فى خطوط مستقيمة كما تفعل كرات البيسبول . وبالرغم من أن جريمالدى كان قد أثبت منذ زمن بعيد فى عام ١٦٦٠ أن الضوء يمكن أن يحيد ، أى ينحنى حول الأجسام ، إلا أن نيوتن استطاع أن يستنبط تفسيرا لهذه الحقيقة بدلالة جسيماتة الضوئية . ولكن تفسيره لم يكن مرضيا جدا ، وبالرغم من ذلك فإن الناس قد تقبلوا آراءه عن طبيعة الضوء ، ولم تقبل الطبيعة الموجية للضوء على نطاق واسع إلا بعد عام ١٨٠٣ .

وفى عامى ١٨٠٣ و ١٨٠٧ نشر توماس يونج نتائج تجاربة التى توضح ظاهرة التداخل الضوئى . وقد استخدم يونج فى هذه التجارب شعاعا ضيقا من ضوء الشمس ينفذ خلال فتحة فى مغلق نافذة ليسقط بعد ذلك على شقين ضيقين متوازيين فى قطعة من الورق المقوى فى وجود ستار على الجانب الايمن من الشقين كما هو موضح فى الشكل ٢٥ – ٥ . وعندئذ لاحظ يونج ظهور بقع ساطعة ومظلمة متبادلة على الستار كما هو مبين . وهذا يذكر كثيرا بالعقد والبطون التى تشاهد عند مرور الموجات المترابطة خلال شقين .

ومن الواضح أنه إذا كان الضوء موجيا فى طبيعته فإن الموجات المنبعثة من الشقين S_1 و S_2 فى الشكل ٢٥ – ٥ سوف تتداخل مع بعضهما البعض . ولهذا فإن الموجتين المنبعثتين من المصدرين لابد أن تكونا متفقتى الطور عند أى من نقط السطوع على الستار . وحيث أن المصدرين منشطين بواسطة نفس الموجة المستوية الساقطة أساسا ، فإن المصدرين سيبعثان بموجتين متفقتى الطور . نظرا لأن المسافة بين كل من المصدرين S_1 و S_2 والنقطة O متساويتين ، فإن الموجتين اللتين تصلان من المصدرين S_1 و S_2 الى النقطة O تقطعان نفس المسافة . وعليه فإنهما سوف تقويان كل منهما الأخرى وبذلك ستكون O بطن ضوئى ، أى بقعة ساطعة .

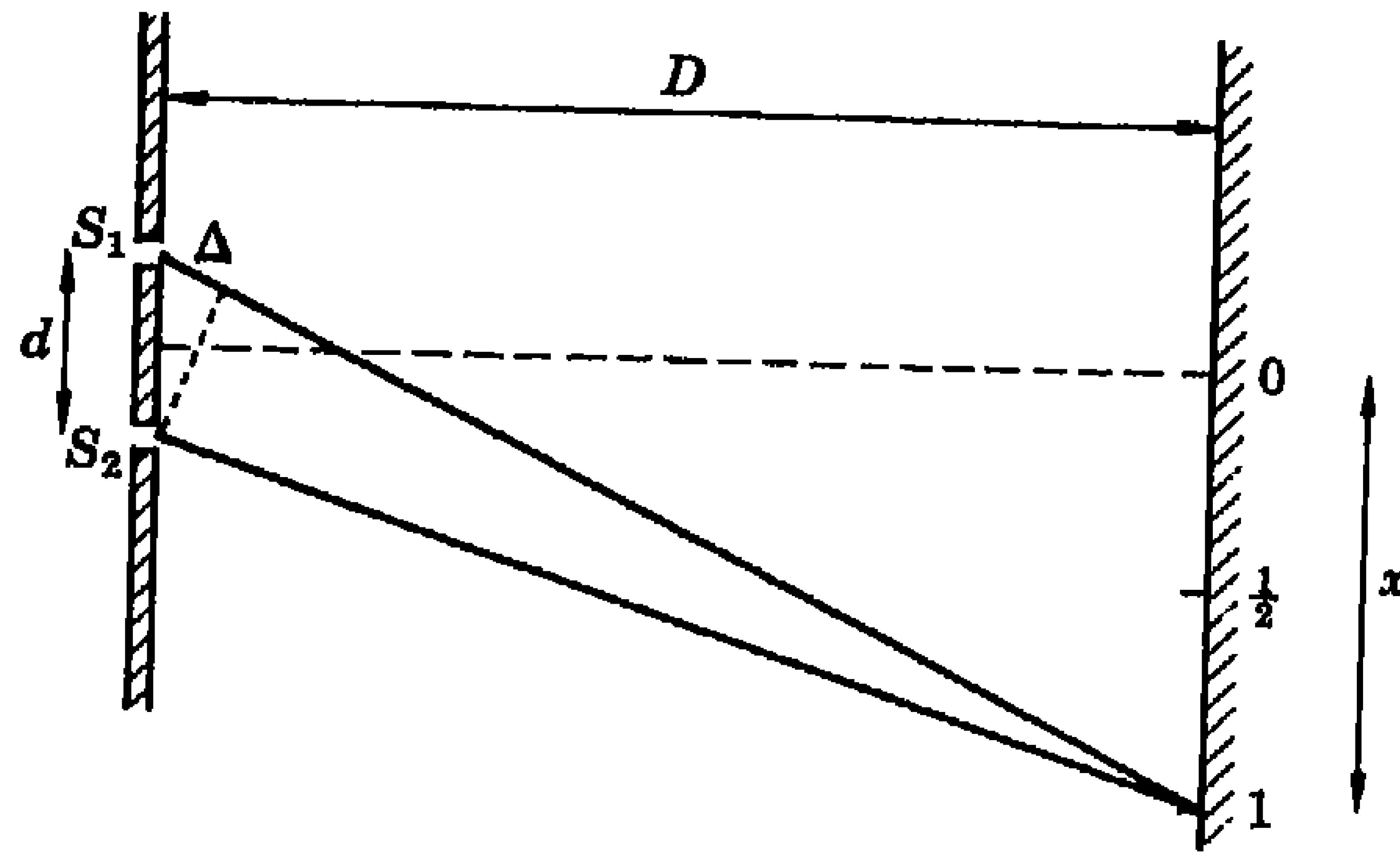
ولكى نحصل على البقعة الساطعة 1 على كل من جانبى البقعة الساطعة المركزية (أو النهاية العظمى) ، لابد أن تكون الموجتان المنبعثتان من S_1 و S_2 متفقتى



شكل (٢٥ – ٥) يعمل الشقان S_1 و S_2 كمصدرين لموجتين مترابطتين . وفى حالة الموجات الضوئية تكون المسافة بين هدب التداخل عادة مساوية لبضع ملليمترات قارن هذا الشكل بالشكل ٢٥ – ٤ لموجات الماء) .

الطور مرة ثانية . ويوضح الشكل ٢٥ – ٦ الموقف عند احدى هذه النقط . (عمليا يجب أن يكون انفصال الشقين d مساويا كسرا من المليمتر فقط ، بينما يجب أن تكون D مساوية مترا أو قريبا من ذلك . ولكننا شوهنا الهندسة الحقيقية للشكل حتى تظهر المسافات واضحة) .

واضح من الشكل أن الضوء المنبعث من S_1 لابد أن يقطع مسافة أطول من تلك التى يقطعها الضوء المنبعث من S_2 بمقدار Δ ومما سبق ذكره يجب أن يكون مفهوما أن الموجتين سوف تقويان كل منهما الأخرى عندما تساوى Δ طولا موجيا واحدا .



شكل (٢٥ – ٦)
عندما يكون الفرق فى المسار λ مساويا للطول الموجى Δ تقوى الموجتان كل منهما الاخرى ويشاهد سطوع .

واذا كانت Δ تساوى طولا موجيا واحدا فإن الموجات الضوئية التى تصل الى 1 من S_1 ستكون متأخرة بمقدار طول موجى كامل بالمقارنة بالضوء المنبعث من S_2 . وكما هو مبين فى الشكل ٢٥ – ٢ حـ ، فإن هاتين الموجتين سوف تقويان إذن كل منهما الأخرى ، وبذلك ستكون النقطة 1 نقطة ساطعة . بالإضافة الى ذلك ، فلكى تصل الموجتان الى النقطة 1/2 لابد أن تقطع الموجة المنبعثة من S_1 مسافة أطول من تلك التى تقطعها الموجة المنبعثة من S_2 بمقدار $\frac{1}{2}\lambda$. وهكذا فإن الموجتين تلاشى كل منهما الأخرى عند النقطة 1/2 وينتج عن ذلك بقعة مظلمة . بالمثل فإن Δ عند النقطة 3/2 فى الشكل ٢٥ – ٥ ستساوى $\frac{3}{2}\lambda$ ، وعليه فإن الموجتين ستلاشى كل منهما الاخرى أيضا . ومع ذلك فان $\Delta = 2\lambda$ عند النقطة 2 ، وينتج عن ذلك تقوية (سطوع) .

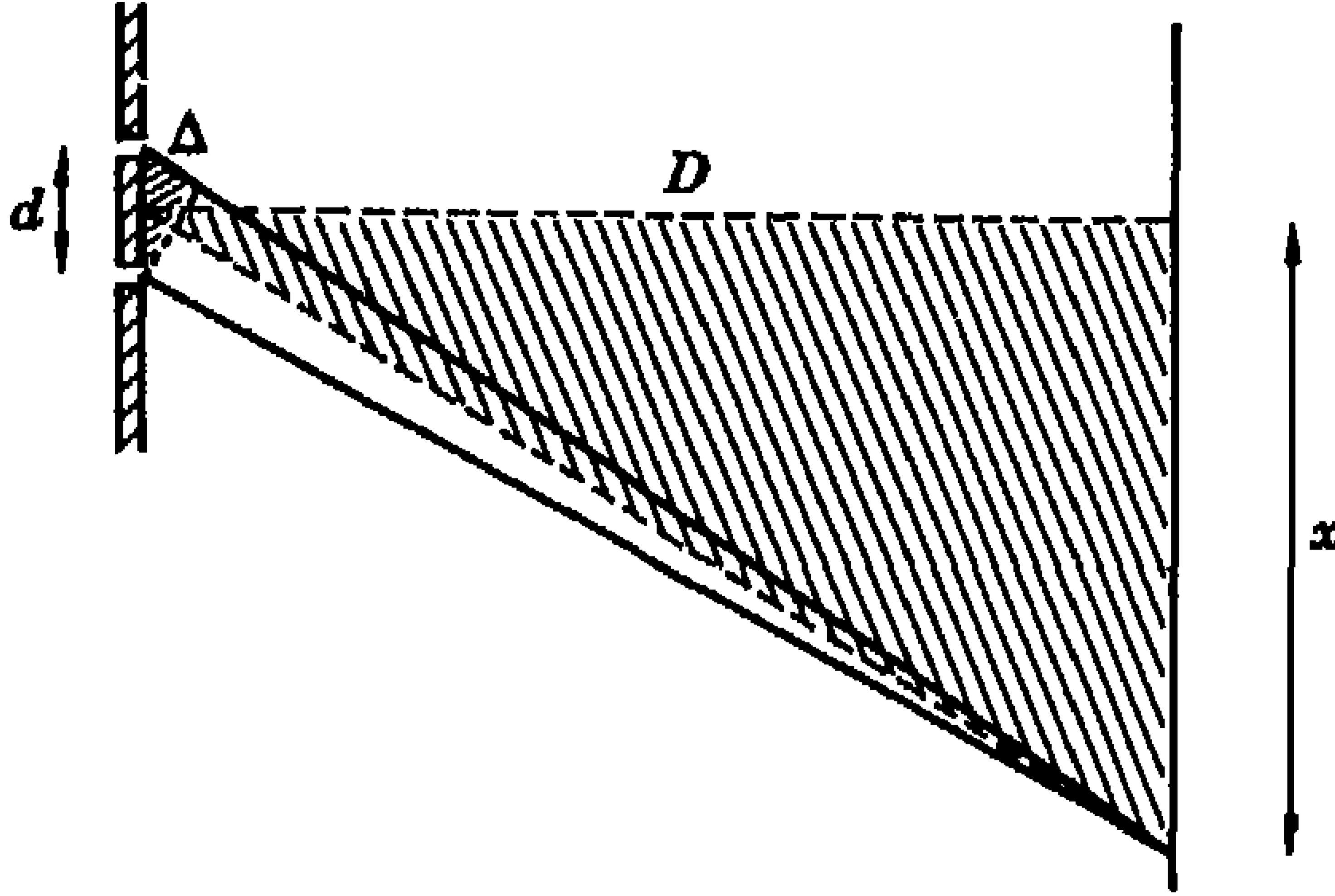
لنشتق الآن العلاقة بين هندسة الشق وطبيعة الضوء وموضع البقع الساطعة بالاستعانة بالشكل ٢٥ – ٧ . نذكر مما سبق أن d أصغر كثيرا جدا من D ، لذلك فإن المثلثين المظللين متشابهان تقريبا . علاوة على ذلك فإن وتر المثلث الكبير يساوى D تقريبا لأن x صغيرة بالمقارنة بالمسافة D . لذلك .

$$\frac{\Delta}{d} \approx \frac{x}{D} \qquad (٢٥ - ١)$$

وهذه هى المعادلة الأساسية فى تجربة الشق المزدوج ليونج .

واذا كانت x فى الشكل ٢٥ – ٧ هى المسافة بين البقعة المركزية الساطعة وبقعة ساطعة جانبية ، فإن Δ يجب أن تكون λ أو 2λ أو 3λ .. الخ . وعموما فان Δ للبقعة الساطعة رقم n من البقعة الساطعة الصفرية الموجودة عند المركز تعطى بالعلاقة .

$$\Delta = n\lambda$$



شكل (٢٥ – ٧)
حيث أن المسافة D أكبر كثيرا من d و x عمليا فإن حقيقة أن المثلثين المظللين متشابهين تعطينا : $\Delta/d = x/D$

أما إذا كانت x هى المسافة بين البقعة الساطعة المركزية وبقعة مظلمة ، فإن Δ يجب أن تساوى $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ ... الخ للبقع المظلمة الأولى والثانية والثالثة...الخ من المركز .

مثال توضيحى ٢٥ – ١

فى إحدى تجارب الشق المزدوج استخدم الضوء الأصفر المنبعث من القوس الصوديومى بدلا من ضوء الشمس . وكانت هندسة التجربة كالتالى :
$D = 100$ cm ، $x = 0.50$ cm ، $d = 0.023$ cm ، حيث x هى المسافة بين البقعة الساطعة المركزية والنهاية العظمى ذات الرتبة الثانية ، أى البقعة 2 فى الشكل ٢٥ – ٥* . اوجد الطول الموجى لضوء الصوديوم .

طريقة الحل . باستخدام المعادلة (٢٥ – ١) وتذكر أن $\Delta = 2\lambda$ للبقعة الساطعة ذات الرتبة الثانية نجد أن :

$$\frac{2\lambda}{d} = \frac{x}{D}$$

أو :

$$\lambda = \frac{(\frac{1}{2})(0.023 \text{ cm})(0.50 \text{ cm})}{100 \text{ cm}} = 5.8 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

* رقم رتبة البقعة الساطعة (الرتبة الصفرية ، الأولى ، الثانية ... الخ) يساوى الفرق بين عددى الأطوال الموجية فى المسارين الممتدين من الشقين المتجاورين الى البقعة الساطعة المعنية . وحيث أن طولى المسارين الممتدين من الشقين الى البقعة الساطعة المركزية متماثلان ، فيقال أن البقعة أو الهدبة الساطعة المركزية هى الهدبة ذات الرتبة الصفرية .

وهى قيمة قريبة من القيمة المقبولة للطول الموجى لضوء الصوديوم الأصفر ، وبالتحديد 5890A° لاحظ أن الأطوال الموجية للضوء صغيرة للغاية . وقد كان يونج أول من قاس الأطوال الموجية للضوء مستخدما هذه الطريقة .

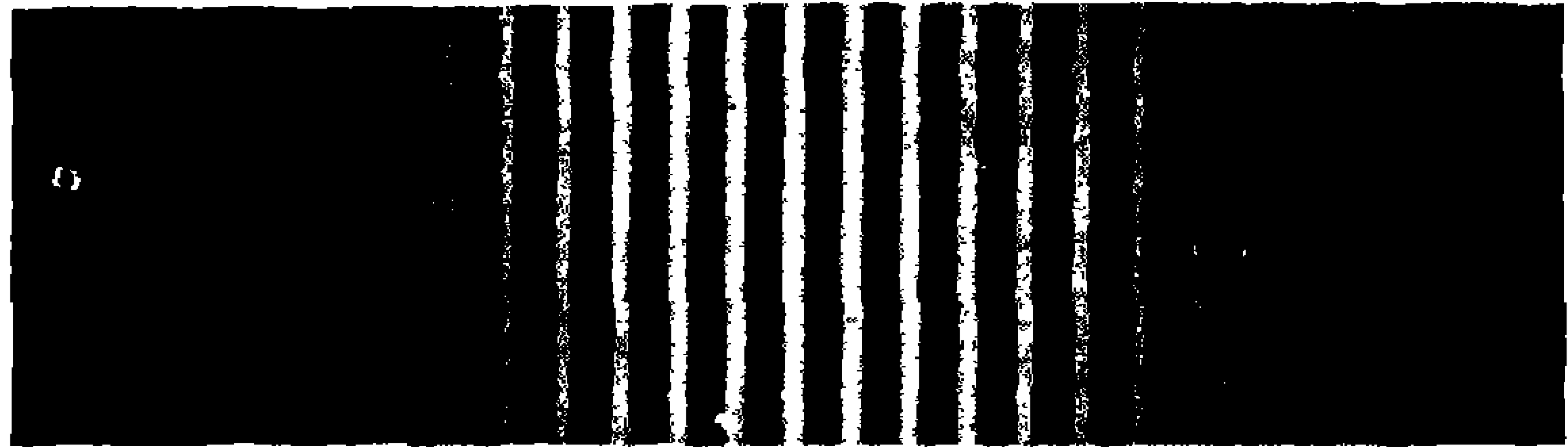
٢٥ – ٤ أنماط التداخل

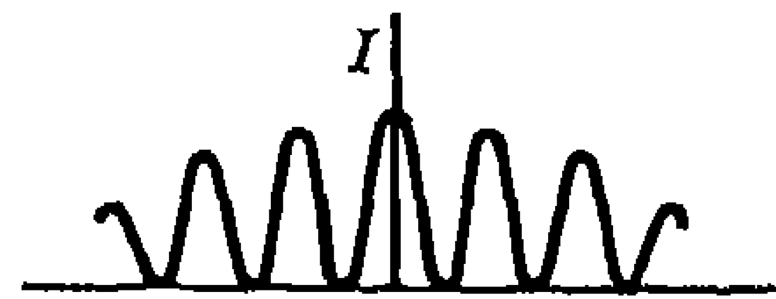
رأينا فى الجزء السابق أن من الممكن استخدام شقين متوازيين للحصول على شرائط أو هدب تداخل ساطعة ومظلمة متبادلة على الستار ، ويمثل الشكل ٢٥ – ٨ نمط تداخل نموذجى لتجربة الشق المزدوج ليونج باستخدام ضوء أحادى اللون (أو أحادى الطول الموجى) . ويمكن تسجيل هذا النظام الهدبى باستبدال الستار فى الشكل ٢٥ – ٧ بلوح فوتواغرافى . لاحظ أن المسافة بين كل هدبتين متتاليتين ثابتة وأن النهاية العظمى ذات الرتبة الصفرية ، أى الهدبة المركزية ، أكثر الهدب شدة .

ويمثل الجزء السفلى من الشكل ٢٥ – ٨ رسما تخطيطيا لشدة الضوء فى نمط التداخل . ومن الممكن حساب الطول الموجى للضوء احادى اللون باستخدام صورة فوتوغرافية كتلك الموضحة فى الشكل ٢٥ – ٨ وذلك باستخدام المعادلة (٢٥ – ١) ، حيث x فى هذه المعادلة هى المسافة بين مركز الهدبة ذات الرتبة الصفرية ومركز الهدبة المعنية . من المعادلة (٢٥ – ١) نجد أن :

$$x = \frac{D}{d} n\lambda$$

حيث n هى رقم رتبة الهدبة الساطعة المعنية ، أى الرقم المبين فوق الهدبة فى الشكل ٢٥ – ٨ . ويلاحظ من الوصلة الأولى أن تباعد الهدب يكون أكثر اتساعا إذا كانت المسافة بين الشقين d صغيرة . وبالطبع كلما زادت المسافة بين الشقين والستار D كلما زاد انفصال الهدب .





شكل (٢٥ – ٨)
هدب التداخل المتكونة بواسطة الشق المزدوج
(After Jenkins and White.)

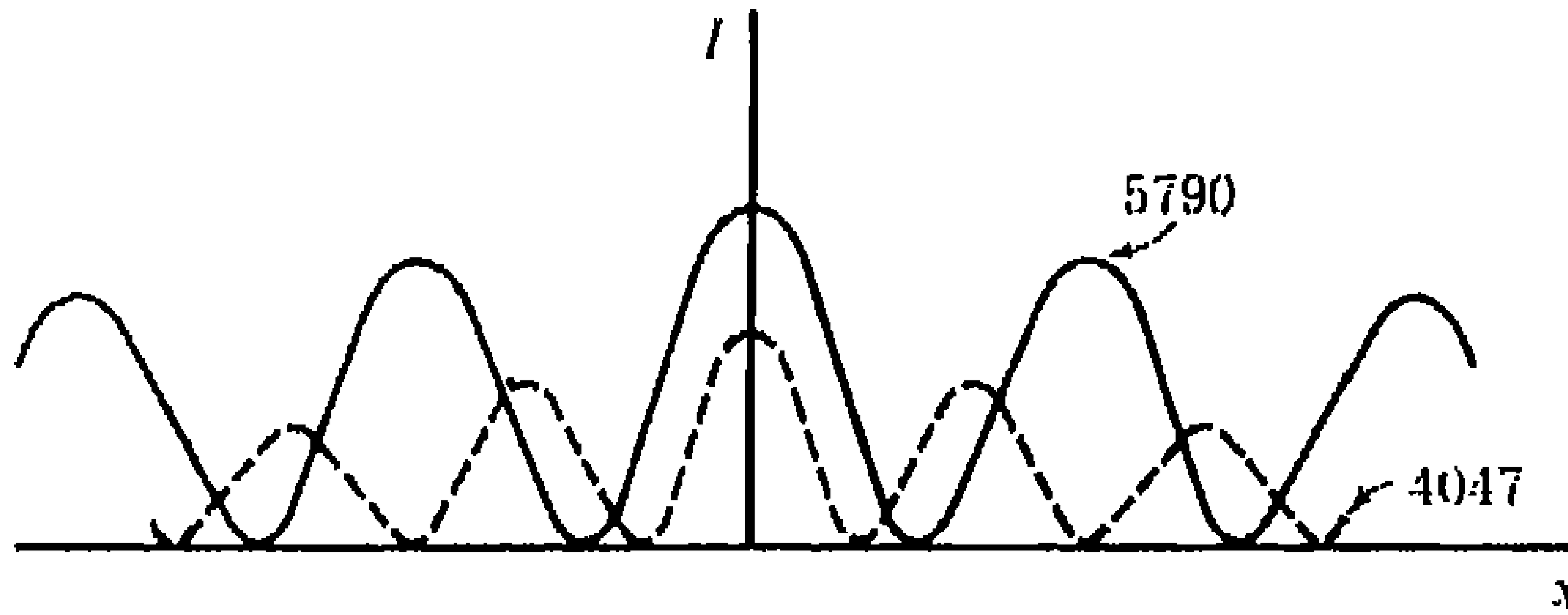
يلاحظ من معادلة X أن انفصال الهدب يعتمد أيضا على الطول الموجي للضوء . وعند إضاءة الشقين بالضوء الأصفر المنبعث من القوس الصوديومي يجب أن نراعى أن هذا الضوء يتكون كلية تقريبا من طولين موجيين هما 5890 A° و 5896A° . ونظرا لأن هذين الطولين الموجيين متقاربان جدا فإن هدبها تتطابق تقريبا . لهذا فإن الشكل ٢٥ — ٨ سيكون مناسبا لهذه الحالة .

ومع ذلك فإن الضوء المنبعث من المصباح الزئبقى المزرق يتكون من عدة ألوان كما هو موضح فى اللوحة الملونة . ويتكون هذا الضوء أساسا من أربعة أطوال موجية هى الاصفر (5790A°) والاصفر المخضر (5461A°) والأزرق (4358°) والبنفسجى (4047A°) . فإذا استخدم هذا الضوء فى تجربة الشق المزدوج ستتكون على الستار أربع مجموعات من الهدب ، واحدة لكل لون . ويعطى انفصال الهدب بالعلاقة التالية .

$$x = \frac{D}{d} n\lambda$$

ولكى نوضح تأثير هذا التعقيد ، اعتبر نمطى التداخل الناتجين من الطولين الموجيين الطرفيين 5790A° و 4047A° . يوضح الشكل ٢٥ — ٩ نمط شدة الضوء لمجموعتى الهدب ، حيث يمثل المنحنى المستمر الهدب الصفراء بينما يمثل المنحنى المقطع الهدب البنفسجية .

ويجب أن يكون واضحا من الشكل ٢٥ — ٩ أنه فى حالة الضوء المتكون من أكثر من طول موجى واحد لا تتطابق هدب التداخل للألوان المختلفة على بعضها البعض وقد لاحظ يونج ذلك لأنه كان يستخدم ضوء الشمس فى تجاربه . وكما هو واضح من اللوحة الملونة ، يتكون ضوء الشمس من جميع الألوان . لهذا فإن الهدب التى شاهدها يونج كانت ملونة بدرجة عالية . وبملاحظة مواضع الألوان فى نمط التداخل استطاع يونج أن يثبت أن اللون الاحمر أطول الألوان فى الطول الموجى وأن اللون البنفسجى أقصرها فى الطول الموجى . وبالطبع فإن قياساته للطول الموجى لم تكن دقيقة جدا لأن هذه الهدب الملونة عريضة ومنتشرة . وحتى عند استعمال الضوء أحادى اللون تكون الهدب عريضة بدرجة ملحوظة كما هو مبين فى الشكل



شكل (٢٥ — ٩)
عندما يضاء الشق المزدوج بطولين موجيين فى نفس الوقت يتكون نمطا تداخل متميزان واحد لكل لون .

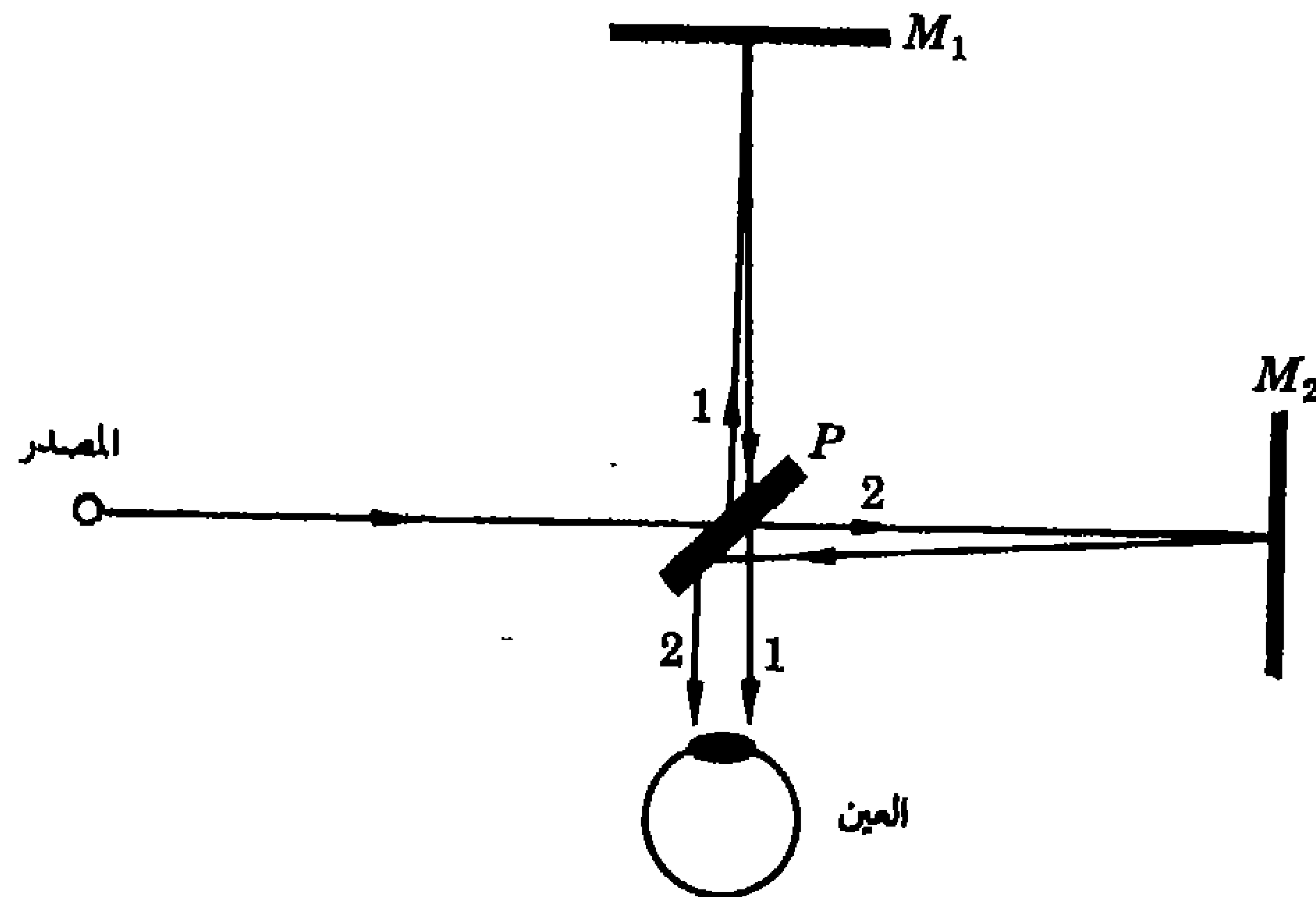
٢٥ — ٨ . ولزيادة الدقة فى قياس الاطوال الموجية يجب استخدام محزوز الحيود الذى يتكون من آلاف الشقوق كما سنرى فى جزء لاحق .

٢٥ — ٥ مقياس التداخل لمايكلسون

يعتبر التداخل بين شعاعين ضوئيين متسقين أساس إحدى الطرق العالية الدقة لقياس الأطوال . ويمثل الشكل ٢٥ — ١٠ رسما تخطيطيا ومبسطا لمقياس التداخل لمايكلسون . يقسم الضوء المنبعث من مصدر أحادى اللون إلى قسمين بواسطة مرآة شبه شفافه P . وينعكس حوالى نصف الشعاع إلى أعلى إلى المرآة M_1 ثم يرتد ثانية إلى P كما هو مبين . أما النصف الآخر فانه ينفذ إلى المرآة M_2 ثم ينعكس راجعا الى P ، حيث ينعكس إلى أسفل كما هو مبين . (وبالطبع هناك أشعة منعكسة أخرى ، ولكن ما يهمنا هما الشعاعان المبينان) .

وإذا قطع الشعاع 1 نفس المسافة التى يقطعها الشعاع 2 فإن الشعاعين سيكونان متفقان فى الطور عند دخولهما عين المشاهد ، وفى هذه الحالة سيرى المشاهد سطوعا . لنفرض الان أن المرآة M_2 قد تحركت مسافة قدرها $\lambda/4$ الى اليمين . وحيث ان الشعاع 2 يجب أن يقطع هذه المسافة مرتين (ذهابا وإيابا) فإنه سيقطع الآن مسافة قدرها $\lambda/2$ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع 1 وعندما يتحد الشعاعان سويا فى العين سوف يلاشى كل منهما الآخر لأنهما متفاوتا المسار بمقدار $\lambda/2$. عندئذ سيرى المشاهد ظلاما .

علاوة على ذلك إذا حركت المرآة M_2 مسافة مساوية أخرى قدرها $\lambda/4$ إلى اليمين فإن الشعاع 2 سوف يقطع فى هذه الحالة مسافة قدرها λ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع 1 . نتيجه لذلك ستقوى كل من الموجتين الأخرى ، وعندئذ يشاهد السطوع مرة أخرى . وواضح أنه عندما تستمر المرآة M_2 فى الحركة ببطء إلى اليمين يتبادل ظهور السطوع والأظلام تباعا وهذا ما يراه المشاهد . وكلما تحركت المرآة



شكل (٢٥ — ١٠)
فى مقياس التداخل لمايكلسون يقطع نصفا الشعاع مسارين مختلفين ، ولهذا فإنهما يمكن أن يتداخلا كل مع الآخر

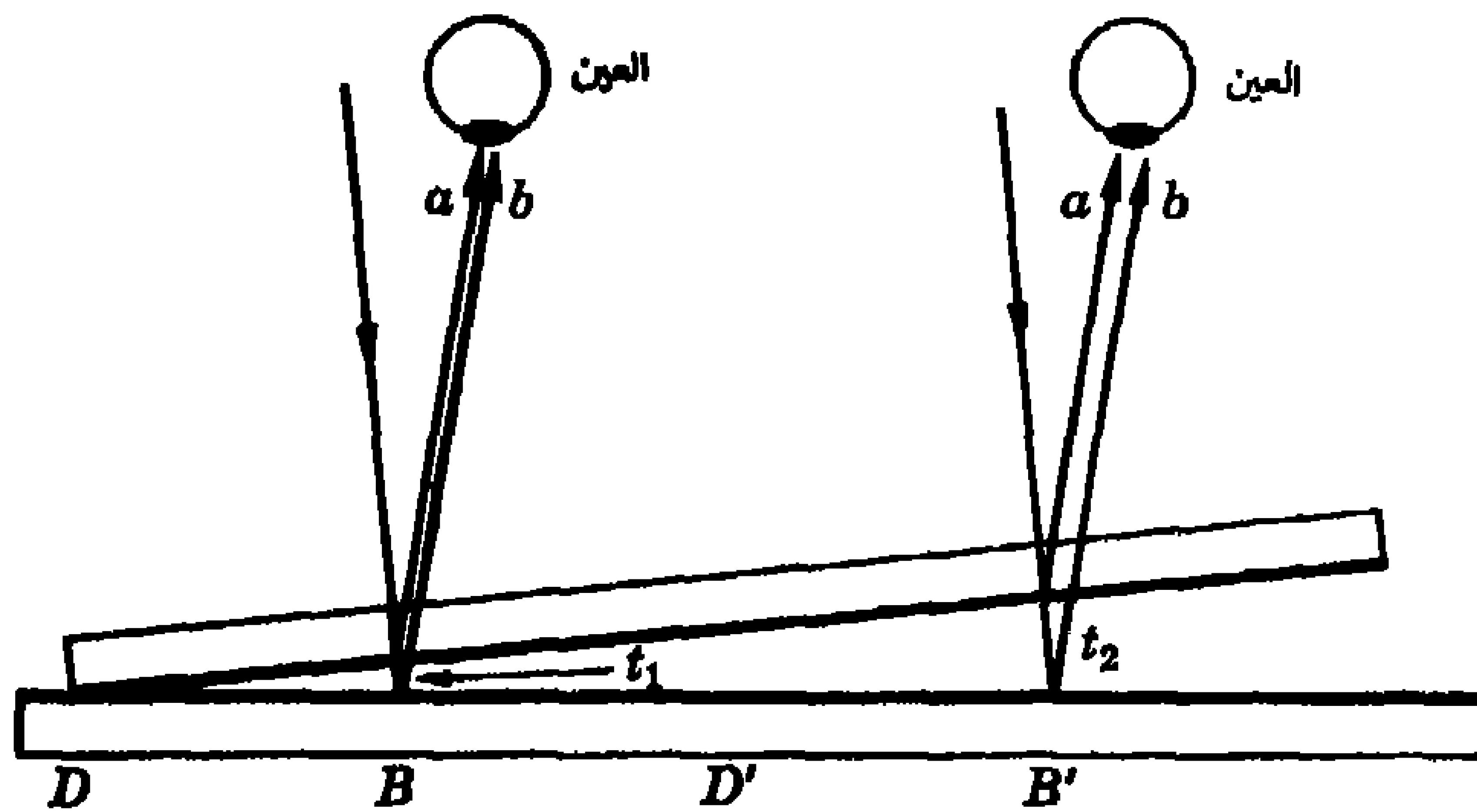
مسافة قدرها $\lambda/2$ تترك الهدبة الساطعة مكانها للظلام ثم يعود السطوع مرة أخرى . وإذا كان عدد الهدب الساطعة التى تظهر للمشاهد عند حركة المرآة M_2 ببطء إلى اليمين هو 1000 فإن ذلك يعني أن المرآة قد تحركت مسافة قدرها $1000(\lambda/2)$

نرى من ذلك اذن أن من السهل قياس المسافة التى تتحركها المراة M_2 بدقة قدرها $\lambda/2$. وحيث أن λ قد تكون 4×10^{-5} cm للضوء الازرق ، من الممكن قياس الحركات الضئيلة التى تصل إلى 0.00002 cm . وفى الحقيقة فإن هذا الجهاز يمكن أن يستخدم لقياس أطوال بدقة تصل إلى واحد من مائة من هذه القيمة باستخدام أساليب تقنية خاصة . وبالرغم من أننا قد أفرطنا فى تبسيط النمط الذى يراه المشاهد بدرجة كبيرة ، فإن هذا الجهاز بسيط جدا . وهذا الجهاز ذو قيمة كبيرة ليس فقط فى قياس الأطوال بدقة كبيرة ، ولكن يمكن استخدامة أيضا لقياس معامل انكسار الغازات .

٢٥ – ٦ التداخل الناتج من الأغشية الرقيقة

تنشأ الالوان الجميلة المنعكسة من غشاء رقيق من الزيت المنتشر على سطح بركة صغيرة من الماء ، وكذلك المظهر الملون لفقاعة الصابون فى الضوء الساطع نتيجة للتداخل الضوئى الذى يحدثه الغشاء الرقيق . وسندرس الآن كيف تنشأ هدب التداخل هذه وكيف يمكن استخدامها لقياس مسافة صغيرة .

نفرض أن لدينا لوحين زجاجيين يحصران بينهما سفينا هوائيا كما هو مبين فى الشكل ٢٥ – ١١ وفى الحقيقة يجب أن تكون الزاوية بين اللوحين أصغر مما هو مبين . وإذا أضيء اللوحان من أعلى بضوء أحادى اللون فإن مشاهدا ينظر إلى اللوحين من أعلى سوف يرى هدبا مظلمة وساطعة متبادلة كما هو موضح بالحرفين D و B فى الشكل .



شكل (٢٥ – ١١)
الشعاعان المنعكسان من سطحى السفين الهوائى يمكن أن يتداخلا كل مع الآخر . هذا الرسم تخطيطى فقط (فى أى وجه يعتبر الرسم غير صحيح ؟)

وتتكون هذه الهدب نتيجة لتداخل الشعاعين المنعكسين من السطحين العلوى والسفلى للسفين الهوائى كما هو مبين بالشعاعين a و b فى الشكل ٢٥ – ١١ . وعندما يرى السطوع عند B يكون الشعاعان إما متفقى الطور أو متفاوتى الطور بمقدار عدد صحيح من الاطوال الموجية . وعندما ننتقل من الهدبه B إلى B' نكون قد أخرنا الشعاع b بمقدار طول موجى واحد كامل . وقد حققنا ذلك بأن جعلنا الشعاع b عند B' يقطع مسافة قدرها $2(t_2 - t_1)$ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع b عند B . (ونحن نهمل الزاوية الصغيرة التى تصنعها الأشعة مع الرأسى) . لهذا فإننا نرى أن السمك قد تغير بمقدار $\lambda/2$ عند الانتقال من هدبة ساطعة إلى الهدبة التالية فى السفين الهوائى . (المسافة هى $\lambda/2$ وليست λ لأن الشعاع يقطع المسافة الزائدة مرتين ، إلى أسفل ثم إلى أعلى) . بالمثل فإن الهدب المظلمة تتكون كلما تغير السمك بمقدار $\lambda/2$.

وعند استخدام الضوء الابيض أو عديد اللون فى هذا النوع من التجارب تقوى الألوان المختلفة فى أماكن مختلفة . نتيجة لذلك تكون الهدب ملونة بدرجة عالية ، وهو ما نشاهد عادة فى فقاعات الصابون وأغشية الزيت فى ضوء الشمس . (هل يمكنك أن تثبت أن الهدب الزرقاء أكثر تقاربا من بعضها من الهدب الحمراء ؟)

إذا ملئ السفين المبين فى شكل ٢٥ – ١١ بسائل بدلا من الفراغ (أو الهواء كتقريب جيد) ، فإن الشعاع b سيتأخر أكثر بالمقارنة بالشعاع a . وحيث أن سرعة الضوء فى سائل معامل انكساره n هى c/n ، فإن الشعاع سيحتاج إلى زمن أطول لقطع مسافة معينة فى السائل بالمقارنة بالزمن اللازم لقطع نفس المسافة فى الفراغ . وفى خلال الزمن الذى يقطع فيه الشعاع مسافة d فى السائل يمكنه أن يقطع مسافة قدرها nd فى الفراغ . لهذا السبب إذا قطع الضوء مسافة d فى مادة معامل انكسارها n فإننا نقول أن **طول المسار الضوئى المكافىء** فى هذه المادة هو nd . وكما ترى فإن الشعاع b فى الشكل ٢٥ – ١١ سوف يقطع مسافة قدرها (n) مضروبة فى ضعف السمك أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع a .

طول المسار الضوئى

ناقشنا فيما سبق حالة سفين ملئ بالهواء . وفى هذه الحالة $n = 1.00$ ، وعليه فإن فرق المسار الضوئى بين الشعاعين b و a هو ببساطة ضعف السمك . ومع ذلك فإذا كان السفين مملوءا بسائل معامل انكساره n فإن فرق المسار سيكون (n) مضروبا فى ضعف السمك . وعليه فإذا كانت t_1 ، t_2 تقابلان بقعتين ساطعتين متجاورتين فإن :

$$2(t_2 - t_1)n = \lambda$$

وهذا يعنى بالالفاظ أن التغير فى السمك بين هدبتين ساطعتين متتاليتين هو $\frac{1}{2}\lambda/n$ بدلا من $\frac{1}{2}\lambda$.

لاحظ أيضا أن نقطة تلامس اللوحين الزجاجيين فى الشكل ٢٥ – ١١ مظلمة . وحيث أن الشعاع b يقطع أساسا نفس المسافة مثل الشعاع a' عند هذه النقطة فإن المتوقع عادة هو أن تكون هذه النقطة ساطعة . وقد حاول الباحثون الأوائل تلميع السطحين بحيث يتم الحصول على سطوع عند هذه النقطة ، ولكنها كانت محاولات عقيمة . وعلى النقيض ، كلما كان التلامس بين اللوحين جيدا ، كلما أصبح الظلام أكثر وضوحا فى هذه المنطقة . ونحن نعلم الآن أن الشعاع المنعكس بواسطة مادة كثيفة ضوئيا ، أى ذات معامل انكسار n' كبير ، يعانى تغيرا فى الطور مقداره $180°$ فى هذه العملية . ومع ذلك فإن هذا لا يهمنا الآن لأننا نهتم أساسا بتغيرات السمك كما سنبين فى المثال التوضيحى الآتى .

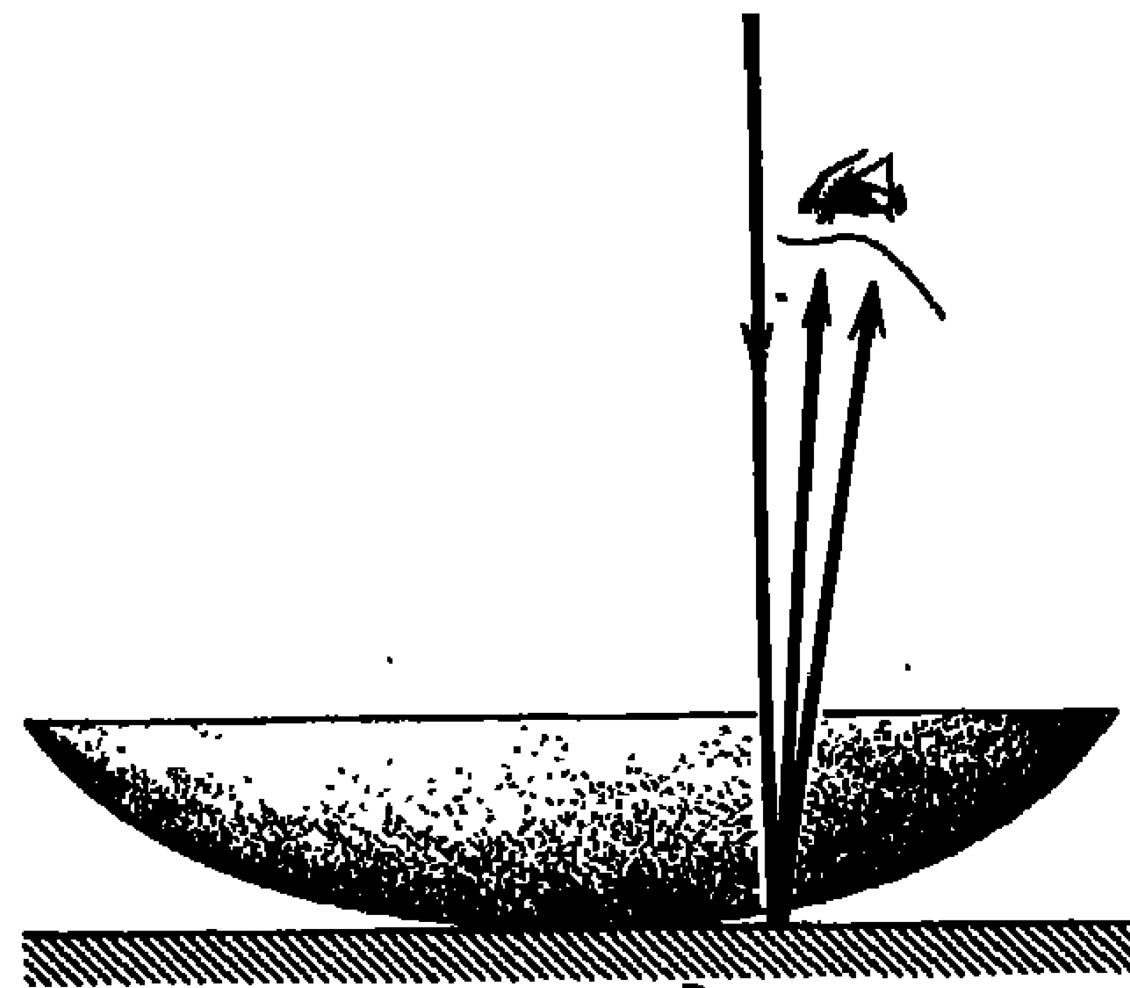
مثال توضيحى ٢٥ – ٢ . يمكن مشاهده الظاهرة المعروفة **بحلقات نيوتن** عندما توضع عدسة محدبة مستوية على لوح زجاجى مستو كما هو مبين فى الشكل ٢٥ – ١٢ أ . وعند اضاءة المجموعة والنظر إليها من أعلى تشاهد مجموعة من حلقات التداخل كما هو مبين فى الجزء ب . فإذا كان الطول الموجى للضوء المستخدم هو 5890A° ، فما هو سمك الفرجة الهوائية عند موضع الحلقة المظلمة العاشرة ؟

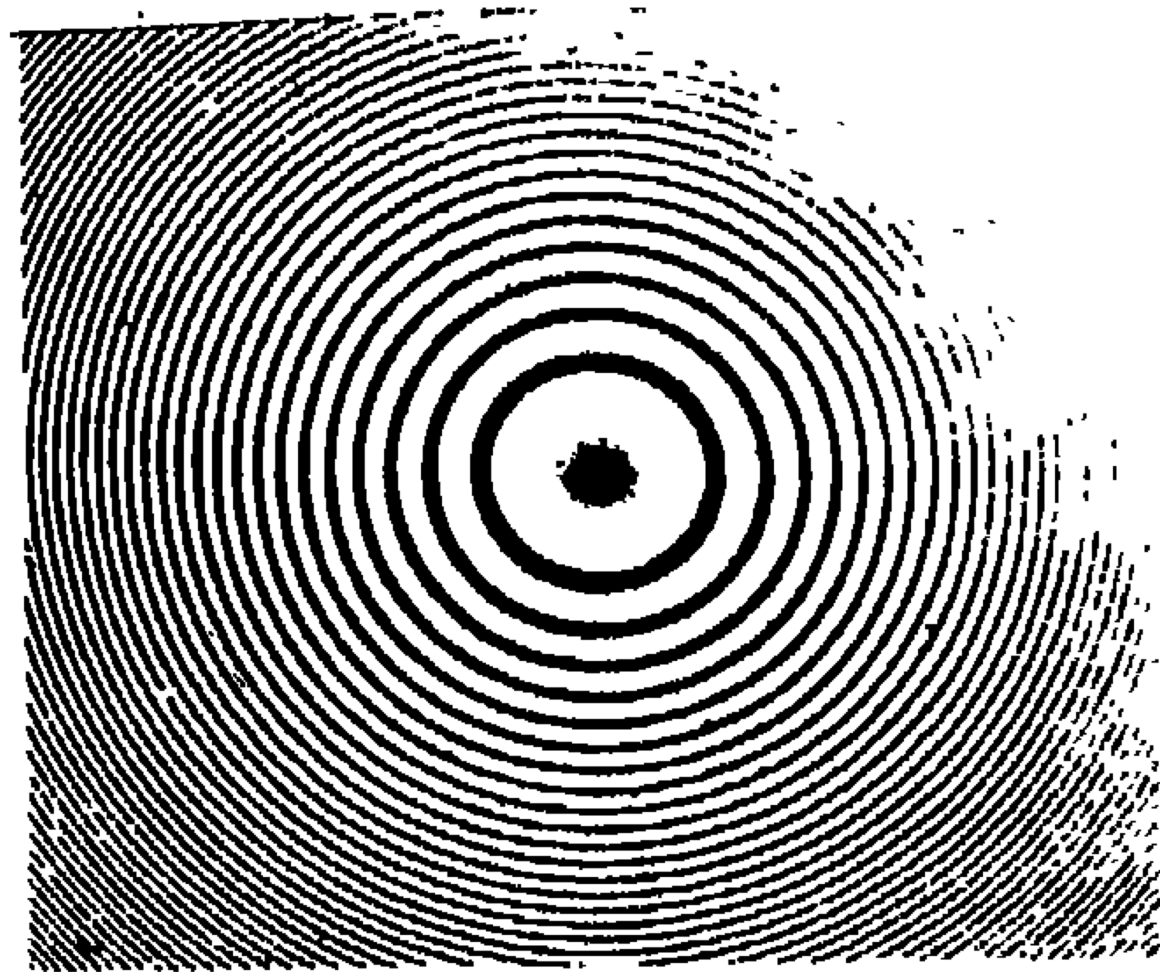
كرر العمل بفرض أن الفرجة مملوءة بالماء (معامل انكسار الماء $n = 1.33$) .

طريقة الحل . البقعة المركزية مظلمة ، وسمك الفجوة الهوائية فى هذا المكان يساوى صفرا . وعند الانتقال إلى الحلقة المظلمة الأولى لابد أن يكون الشعاع قد تأخر مسافة قدرها λ . وعليه فإن سمك الفجوة فى هذا المكان هو $\lambda/2$. بالمثل ، عند الانتقال من الحلقة الأولى إلى الثانية يزداد سمك السفين بمقدار اضافى قدره $\lambda/2$ ، أى أن سمك السفين هو $2(\lambda/2)$. من الواضح إذن أن سمك السفين عند وضع الحلقة المظلمة العاشرة هو $10(\lambda/2)$. إذن سمك الفجوة عند موضع الحلقة المظلمة العاشرة هو :

شكل (٢٥ – ١٢)
كون هدب التداخل ، أى لقات نيوتن ، الموضحة فى ب) نتيجة لتداخل الاشعة ضوئية المنعكسة بواسطة سفين الهوائى المبين فى (أ) . بدون مقياس رسم)

ورة (ب) منشورة بتصريح من I


(أ)


(ب)

$$(10)\left(\frac{5.890 \times 10^{-5}\ \text{cm}}{2}\right) = 2.945 \times 10^{-4}\ \text{cm}$$

وعمليا يمكن أن تستخدم درجة ملاسة وانتظام الدوائر أو هدب التداخل الاخرى لتعيين مدى استواء الاسطح .

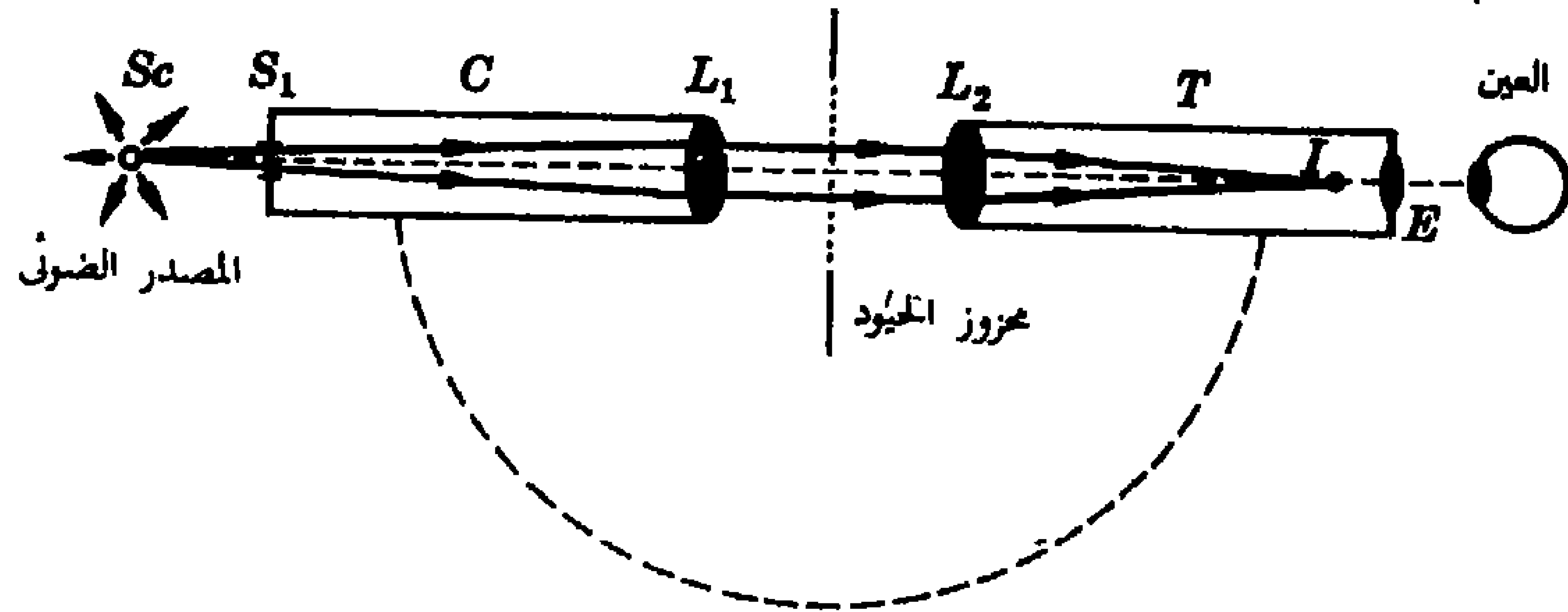
وفى حالة السفين الملىء بالماء يكون طول المسار الضوئى المكافىء 1.33 مضروبا فى ضعف السمك . ونتيجة لذلك فان سمك الفجوة سيكون 1/1.33 مضروبا فى القيمة السابق ايجادها . أى أنه 2.21×10^{-4} cm .

٢٥ - ٧ محزوز الحيود

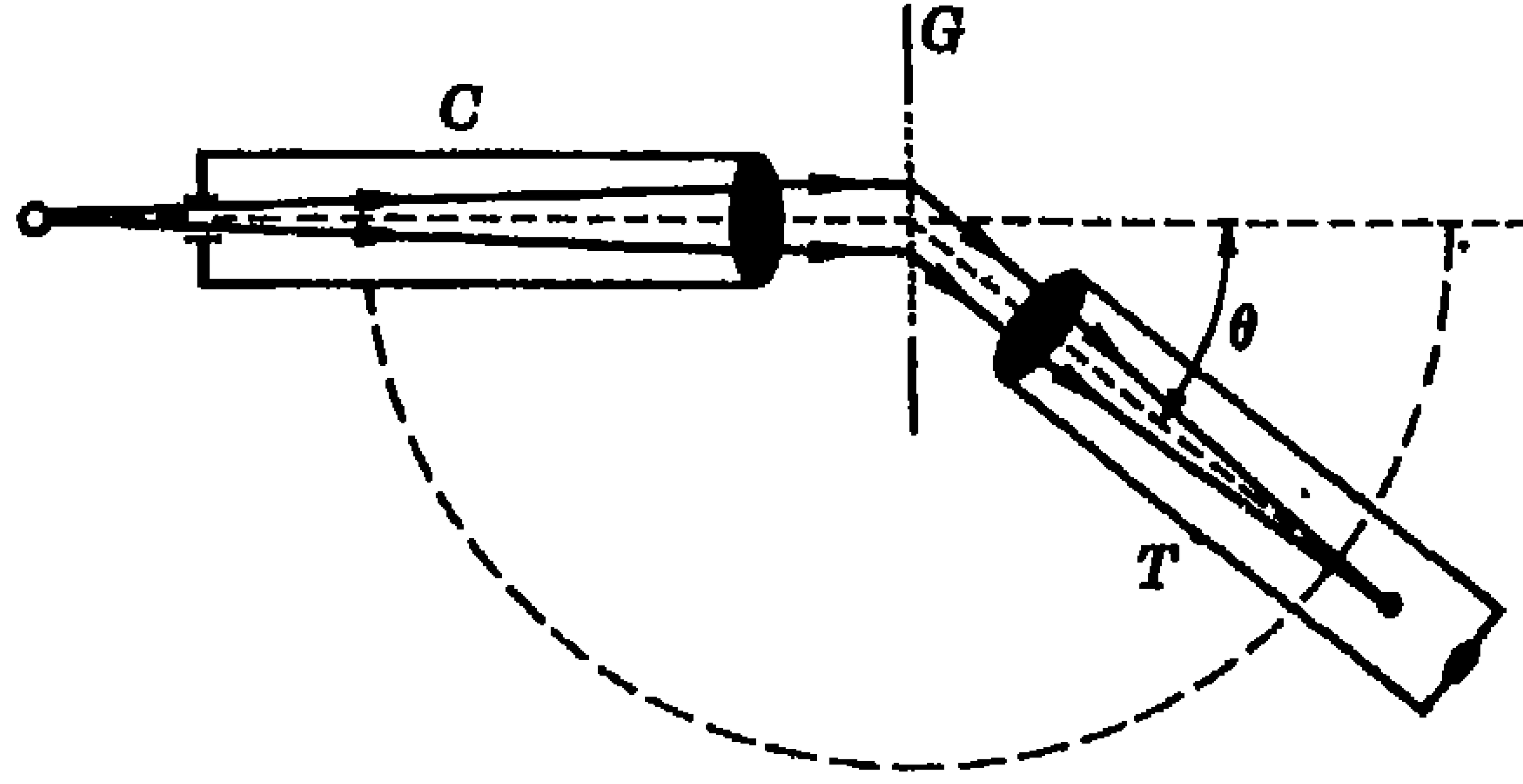
يستخدم محزوز الحيود عادة لقياس الطول الموجى للضوء بدقة كبيرة . ويسمى الجهاز المبنى لهذا الغرض **المطياف ذو محزوز الحيود** . والمحزوز نفسه عبارة عن عدد كبير من الشقوق المتوازية فى ستار معتم منتظمة البعد عن بعضها البعض .

ويحتوى المحزوز العادى على 10,000 شق فى مسافة قدرها 1 cm . وعليه فان المسافة d بين مركزى شقين متجاورتين ستكون 0.0001 cm . وسوف نرى أن عمل هذا الجهاز لا يختلف كثيرا عن شقوق يونج المزدوجة .

يمثل الشكل (٢٥ - ١٣) رسما تخطيطيا لمطياف (أو مرسمة طيف) معتاد ذى محزوز حيود . يضىء الضوء من المصدر Sc الشق S_1 الموجود فى نهاية أنبوبة C تسمى **الميزاء (أى موجه الاشعة)** ، وهى تستخدم لجعل الاشعة متوازية . ويتم ذلك بأن توضع العدسة L_1 فى موجة الاشعة بحيث تكون S_1 فى بؤرتها . ولهذا فان الضوء الخارج من الشق يتحول الى ضوء متواز ، أى مسدد ، بواسطة العدسة L_1 . وتمر هذه الحزمة الضوئية المتوازية بعد ذلك فى محزوز الحيود وتدخل التلسكوب T . وتكون العدسة L_2 صورة للشق عند I وتشاهد هذه الصورة فى العدسة العينية E . والتلسكوب مصمم بحيث يمكن ادارته بزوايا معلومة بدقة كما هو مبين فى الشكل (٢٥ - ١٤) .



شكل (٢٥ - ١٣) رسم تخطيطى لمطياف ذى محزوز حيود

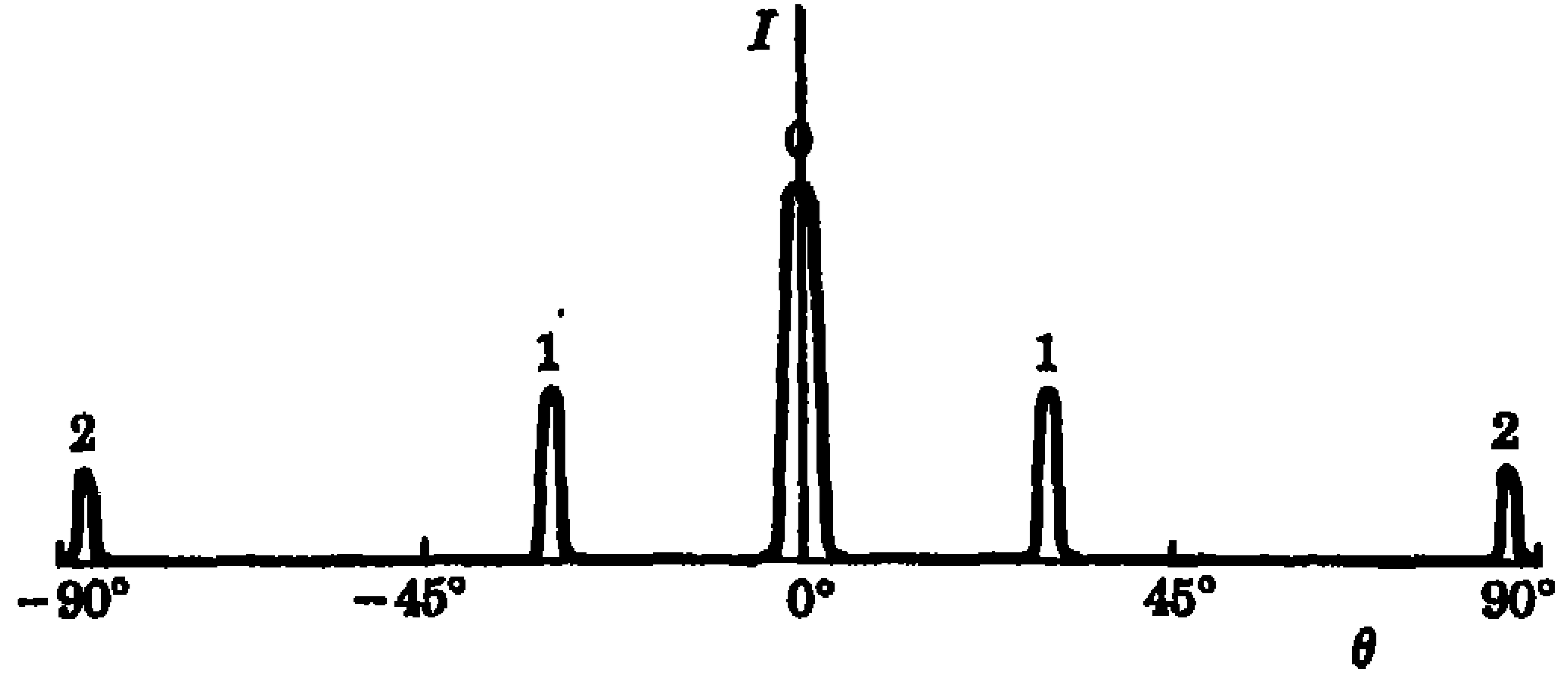


شكل (٢٥ - ١٤)
عندما يدار التلسكوب على قوس دائرة كما هو مبين تتكون صورة للشق بالتداخل عند الزاوية θ بالنسبة للشعاع المباشر

وبالطبع عندما تكون الزاوية θ صفرا يرى المشاهد صورة واضحة لشق موجه الاشعة . وتسمى هذه الصورة بأسماء مختلفة هى **النهاية العظمى المركزية ، النهاية العظمى ذات الرتبة الصفرية ، الصورة المركزية** . ويلاحظ أن لون هذه الصورة هو نفس لون المصدر الضوئى ، فاذا استخدم الضوء الابيض فان الصورة المركزية تكون بيضاء أيضا . وعندما تتطابق الشعيرتين المتعامدتين الموجودتين فى التلسكوب مع هذه الصورة تكون الزاوية θ فى الشكل (٢٥ - ١٤) صفرا .

من المتوقع أن تتشابه ظواهر التداخل المشاهدة بواسطة مثل هذا الجهاز عديد الشقوق الى حد ما مع تلك الظواهر التى تشاهد بواسطة الشق المزدوج . وهذا صحيح بالفعل . ومع ذلك فان نمط الحيود المشاهد فى حالة محزوز يحتوى على آلاف الشقوق أكثر حده من النمط المتكون فى حالة الشق المزدوج . وعند استخدام الضوء الاصفر المنبعث من القوس الصوديومى لاضاءة شق موجه الأشعة سنشاهد نمط شدة الضوء المبين فى الشكل (٢٥ - ١٥) كدالة فى الزاوية θ .

وفى حالة الجهاز الجيد تكون الصور المتكونة عند المواضع 0 ، 1 ، 2 أكثر حده مما هو مبين . وبمقارنة هذا الشكل بالشكل (٢٥ - ٨) الذى يمثل رسما تخطيطيا مشابها لنمط التداخل المتكون بواسطة الشق المزدوج سنجد أن نمط التداخل فى حالة محزوز الحيود أكثر اتساعا فى الزاوية وأكثر حده من نمط التداخل المتكون بواسطة الشق المزدوج . وتسمى الصور المرئية خلال التلسكوب عند زوايا متساوية على جانبى النهاية العظمى المركزية **بالنهايات العظمى ذات الرتب العليا** . فمثلا تسمى الصورتان 1 فى الشكل ٢٥ - ١٥ **بالنهايتين العظميتين** ، أو الطيف ، **ذات الرتبة الثانية** . وقد ترى رتبة واحدة أو ربما عدة رتب قبل الوصول الى الموضع 90° ويعتمد ذلك على جوده محزوز الحيود . والآن سوف نشتق العلاقة بين مواضع الرتب والطول الموجى للضوء .



شكل (٢٥ – ١)
يعطى محزوز الحيود صورة مركزية وصورا جانبية متماثلة وتكون الخطوط أكثر حدة مما هو مبين فى حالة المحزوز الجيد .

اعتبر محزوز حيود يحتوى على أربعة آلاف شق مستعينا بالشكل (٢٥ – ١٦) . من الواضح أن الأشعة المباشرة ، أو المستقيمة ، المبينة فى الجزء أ متفقة الطور وأنها سوف تقوى كل منها الاخرى عند تجميعها فى داخل التلسكوب .

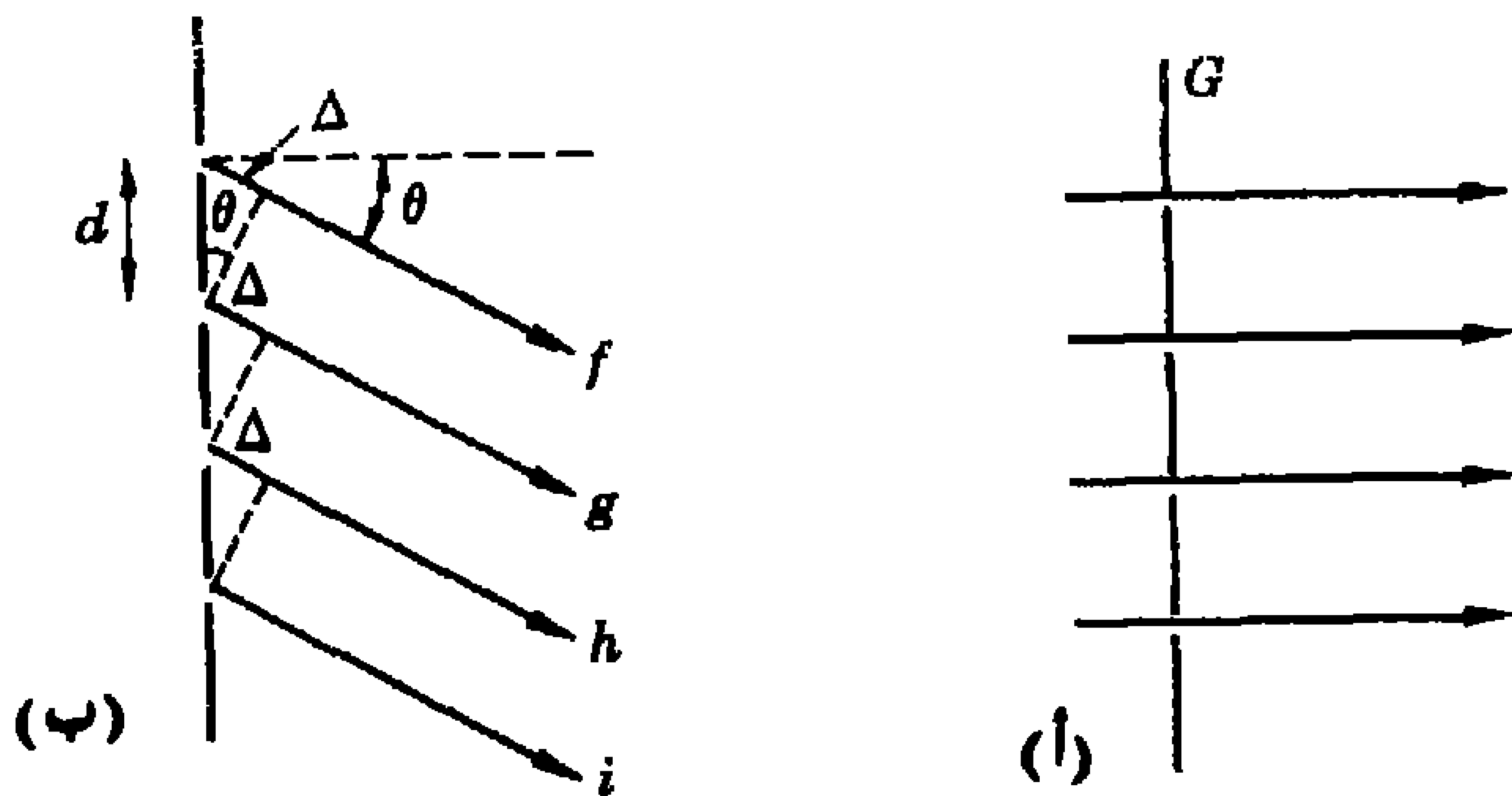
ومع ذلك فان الاشعة الخارجة من الشقوق والمبينة فى الجزء ب سوف تقطع مسافات مختلفة لتصل الى التلسكوب . وكما هو مبين يقطع الشعاع f مسافة قدرها Δ أطول من المسافة التى يقطعها الشعاع g . كذلك فان g يقطع مسافة قدرها Δ أطول من تلك التى يقطعها h وهكذا . فاذا كانت المسافة Δ مساوية لعدد صحيح من الأطوال الموجية ، فان الاشعة الخارجة من جميع الشقوق سوف يقوى كل منها الآخر . وتتكون النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى اذا كانت $\Delta = \lambda$ ، كذلك فان النهاية العظمى ذات الرتبة الثانية تتكون عندما تكون $\Delta = 2\lambda$. وعموما فان النهاية العظمى ذات الرتبة n (اذا كان ذلك ممكنا) تتكون عندما تكون $\Delta = n\lambda$.

يتضح لنا من الوهلة الأولى من المثلث الصغير فى الجزء (ب) من الشكل (٢٥ – ١٦) أن .

$$\sin\theta = \frac{\Delta}{d}$$

وحيث أن $\Delta = n\lambda$ بالنسبة للنهاية العظمى ذات الرتبة n ، فان الموضع الزاوى θ_n للنهاية العظمى ذات الرتبة n تعطى بالمعادلة الآتية :

معادلة المحزوز ٢٥ – ٢
$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$



شكل (٢٥ – ١٦)
تقوى الاشعة كل منها الآخر اذا كانت المسافة Δ فى الجزء (ب) مساوية لعدد صحيح من الاطوال الموجية . ويكون المحزوز النهايات العظمى عند هذه الزوايا بالذات .

وهذه المعادلة تسمى معادلة المحزوز .

وحيث أن من الممكن قياس الزاوية التى توجد عندها النهاية العظمى ذات الرتبة n بدقة كبيرة ، فإنه من الضرورى معرفة البعد البينى للمحزوز d فقط لكى يمكننا تعيين λ بدقة . فمثلا ، اذا استخدمنا الضوء الصوديومى فى مطياف بسيط فاننا سوى نرى بسهولة أن الضوء الصوديومى يعطى صورتين (أو خطين) للشق عند كل موضع للرتب المختلفة وهذان الخطان متقاربان وطولاهما الموجيان هما 5890A° و 5896A° . وتعتبر حقيقة أننا نستطيع رؤية هذين الخطين كصورتين متميزتين مقياسا لدقة مثل هذا الجهاز .

أنواع الطيف

واذا استخدمنا الضوء الزئبقى فى مطياف ذى محزوز فاننا سوف نرى عده خطوط ملونة مختلفة فى كل رتبة . وكما وضحنا سابقا ، يتكون الضوء الزئبقى من خط أصفر (5790A°) وخط أصفر مخضر (5461 A°) وخط أزرق (5358 A°) وخط بنفسجى (4047A°) بالاضافة الى خطوط أخرى باهتة أقل أهمية (تسمى الخطوط الموجودة فى طيف المصدر الضوئى بخطوط الطيف . وهى فى الحقيقة صور لشق مرسمة الطيف . وتظهر هذه الصور كخطوط ساطعة فى الصورة الفوتوغرافية ، ولذلك تستخدم كلمة خط) . وسوف نرى فى فصول لاحقة أن هناك أيضا أنواع أخرى من المصادر الضوئية . فبينما يتكون الضوء المنبعث من القوس الزئبقى من خطوط متميزة سهلة الرؤية (تسمى **الطيف الخطى الساطع**) ، يحتوى الضوء المنبعث من المصابيح المتوهجة على جميع الالوان ولا تشاهد أى خطوط حادة فيه . لذلك يقال أن المصدر الضوئى المتوهج يعطى **طيفا مستمرا** لاننا نشاهد شريطا مستمرا من الالوان عندما يستخدم هذا المصدر فى مطياف وتوضح هذه الحقائق بجلاء فى اللوحة الملونة .

مثال توضيحى ٢٥ - ٣ يحتوى محزوز حيود معين على 10.000 خط فى السنتيمتر عند أى الزوايا يظهر خط طوله الموجى 5890A° ؟

طريقة الحل . البعد البينى للمحزوز d يساوى $\frac{1}{10,000}$ cm باستخدام معادلة المحزوز نجد أن :

$$\sin\theta_1 = \frac{5.89 \times 10^{-5}}{10^{-4}} = 0.589$$

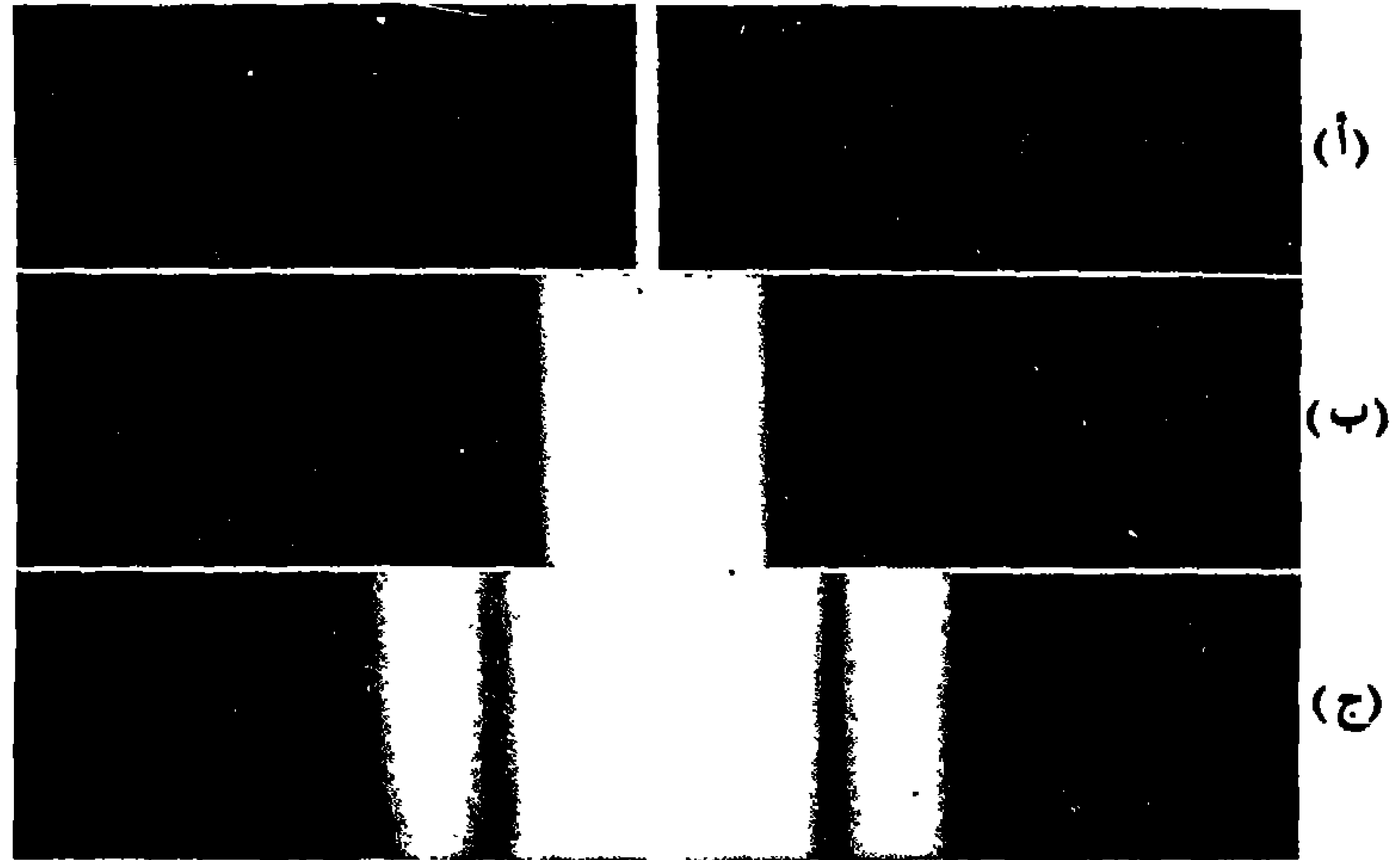
ومن جداول الجيوب نجد أن $\theta_1 = 36°$ ، وعلية فان الصور ذات الرتبة الاولى سوف توجد عند هذه الزاوية على جانبى النهاية العظمى المركزية . وبالنسبة للرتبة الثانية نجد أن :

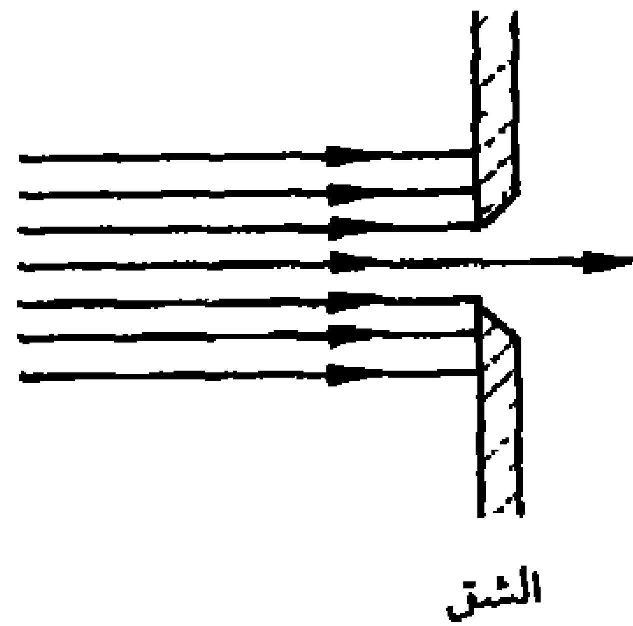
$$\sin\theta = (2)\left(\frac{5.89 \times 10^{-5}}{10^{-4}}\right) = 1.178$$

وحيث أن جيب الزاوية لا يمكن أن يكون أكبر من الوحدة ، فان الصور ذات الرتبة الاعلى لن توجد .

٢٥ – ٨ الحيود بواسطة شق احادى

بناءا على ماسبق ذكره فى الاجزاء الاولى من هذا الفصل لا يجب أن ندهش عندما نعلم أن الحزمة الضوئية لا تعطى صورة حادة للشق الذى تمر خلاله . فمثلا ، عندما تمر حزمة ضوئية خلال شق احادى كما هو مبين فى الشكل (٢٥ – ١٧ د) تظهر الصور المحصلة على اللوح الفوتوغرافى كما هو مبين فى الجزئين ب ،حـ من الشكل . ومن الواضح أن البقعة الساطعة المركزية أكثر اتساعا من الشق بدرجة كبيرة . علاوة على ذلك يلاحظ ظهور شرائط ساطعة على جانبى الصورة المركزية . وهى تتكون نتيجة لنوع معين من ظواهر التداخل . لنتعرف الآن على ما يحدث فى مثل هذا الموقف .





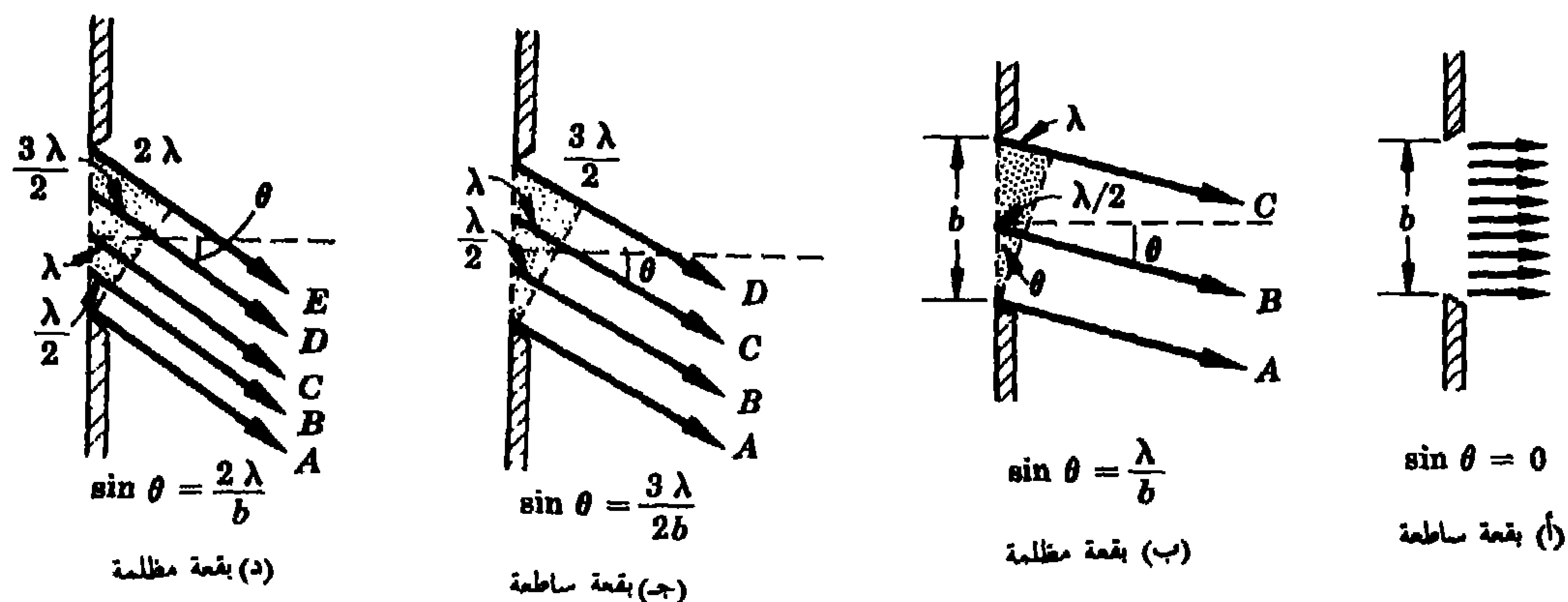


شكل (٢٥ – ١٧) صورة فوتوغرافية لنمط حيود الشق الأحادى المتكون باستخدام الترتيبة المبينة فى (د) . عرض الشق موضح فى (أ) . ويمثل (ب) و (حـ) صورتين فوتوغرافيتين التقطتا باستخدام زمنى تعريض مختلفين *(After Jenkins and White.)*

واضح من الشكل (٢٥ – ١٨أ) أن الاشعة الضوئية التى تمر خلال الشق الاحادى فى اتجاه السقوط متفقة جميعها فى الطور . لذلك فان الموضع الذى يقع على خط مستقيم مع الشق فى اتجاه السقوط يكون ساطعا مما يؤدى الى ظهور البقعة الساطعة المركزية المبينة فى الشكل (٢٥ – ١٧) . وبالرغم من ذلك فان الاشعة التى تترك الاجزاء المختلفة للشق فى اتجاه يصنع زاوية θ مع الحزمة الضوئية المباشرة سوف تقطع مسافات مختلفة الى الفيلم الحساس أو اللوح الفوتوغرافى .
ويمثل الشكل (٢٥ – ١٨ ب ، حـ ، د) أهم الحالات .

يلاحظ من الجزء ب أن الشعاع B الذى يترك الشق عند منتصفة متأخر بمقدار نصف الطول الموجى عن الشعاع A . نتيجة لذلك يلاشى كل من هذين الشعاعين الآخر . ولكن هذا ليس كل ما فى الأمر ، لأننا نرى أن الشعاعين اللذين يتركان الشق عند الموضعين اللذين يقعان فوق A و B مباشرة يلاشى كل منهما الآخر أيضا لأن فرق المسار بينهما هو $\lambda/2$ أيضا . وفى الحقيقة فان كل شعاع يترك النصف العلوى للشق سيجد شعاعا آخر يترك النصف السفلى ويلاشيه . وعليه فلن يصل أى ضوء من الشق الى الفيلم عند هذه الزاوية θ ، ولذلك فاننا سنلاحظ ظلاما فى هذا الموضع . وكما نرى من الشكل يحدث ذلك عندما تكون $\theta = \lambda/b$ ، حيث b عرض الشق . لاحظ أنه اذا كان عرض الشق b مساويا للطول الموجى للضوء فان البقعة المظلمة تتكون عند $\theta = 90°$.

شكل (٢٥ – ١٨)
عند تحليل نمط الحيود المتكون بواسطة الشق الأحادى كميا يقسم الشق إلى أجزاء تختلف أشعتها فى طول المسار بمقدار $\lambda/2$. لماذا ؟



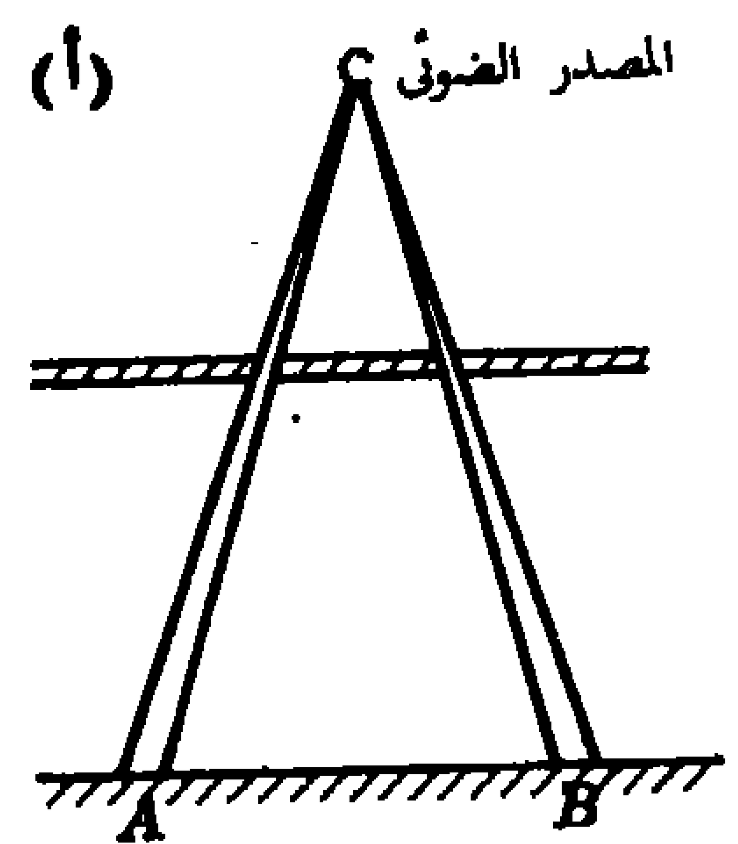
ويمكننا صياغة ذلك بالألفاظ كالتالى : إذا نقص عرض الشق حتى أصبح مساويا للطول الموجى للضوء λ فإن صوره الشق تنتشر لتصبح لانهائية فى العرض .

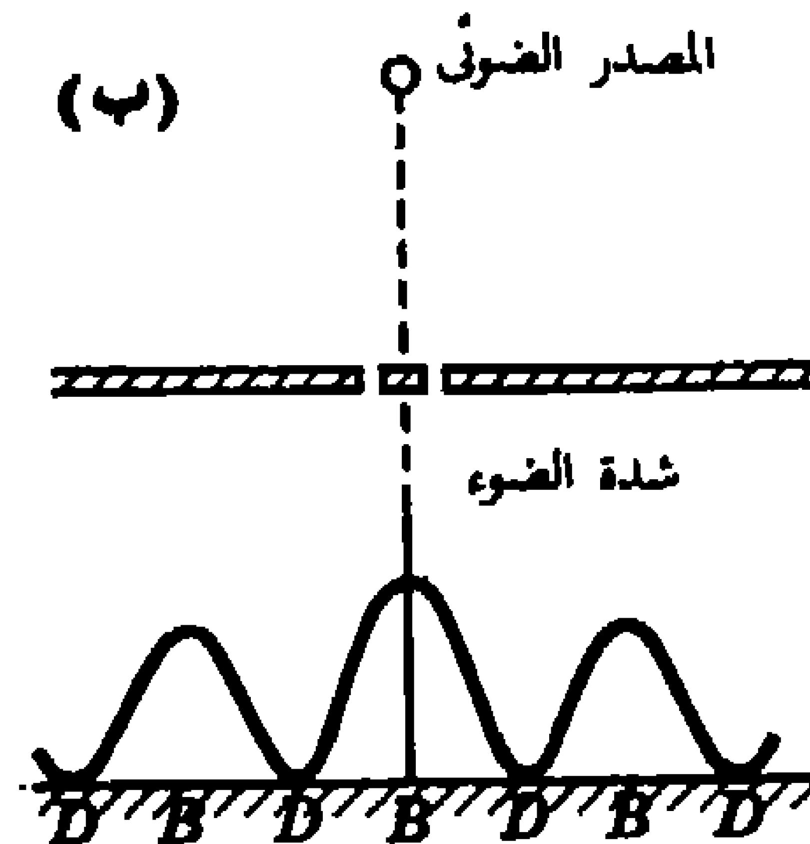
واذا كان b أكبر كثيرا من λ ، كما هو موضح فى شكل ٢٥ – ١٨ ، تتكون هدبة ساطعة عند الزاوية θ المبينة فى الجزء حـ . وفى هذه الحالة تلاشى الأشعة التى تترك الثلث السفلى للشق الأشعة التى تترك الثلث الأوسط بينما لا تتلاشى الأشعة التى تترك الثلث العلوى . ويتكون الظلام مرة أخرى عند الزاوية الأكبر المبينة فى الجزء د. وهنا يمكننا أن نعتبر أن الشق مكون من أربعة أرباع . وفى هذه الحالة تتلاشى أشعة الربع السفلى مع أشعة الربع الذى يقع فوقة مباشرة . وبالمثل تلاشى أشعة الربعين العلويين كل منهما الآخر ، ولذلك يشاهد الظلام عند هذه الزاوية . وهذه هى إذن تفسيرات السمات المختلفة لنمط حيود الشق الأحادى الموضح فى الشكل ٢٥ – ١٧ .

٢٥ – ٩ الحيود وحدود التحليل

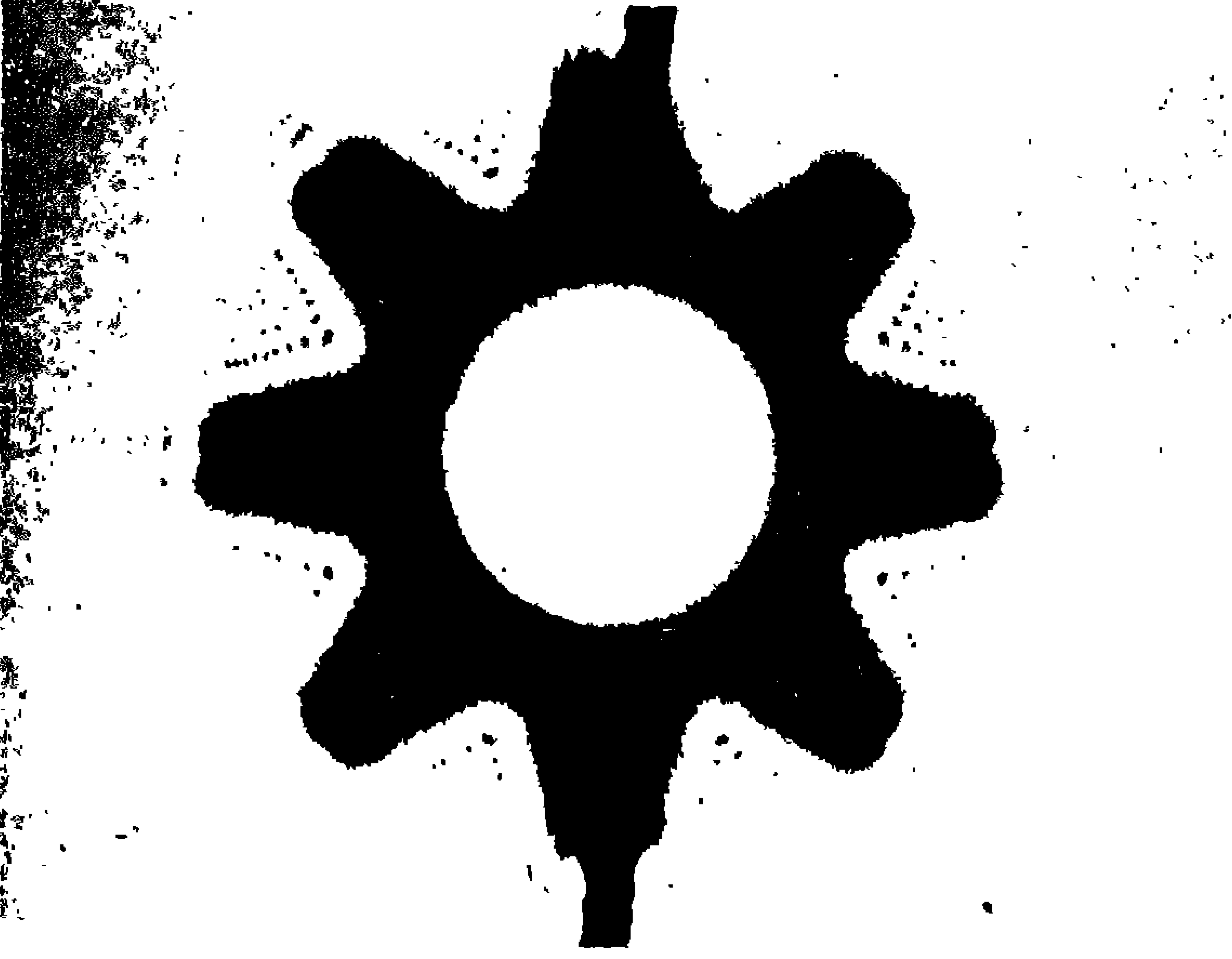
يقال عادة أن الضوء يسير فى خطوط مستقيمة . فعند مرور الضوء خلال فتحتين فى سور نتوقع أن نرى حزمتين ضوئيتين خارجتين من الفتحتين كما هو مبين فى الشكل ٢٥ – ١٩أ . نتيجة لذلك لابد أن تظهر بقعتان ساطعتان A و B على الحائط المواجه للسور . وهذا هو ما يشاهد بالفعل . وبالرغم من ذلك فإن الموقف يختلف تماما إذا كانت الفتحتان ضيقتين ومتقاربتين جداً كما فى حاله الشق المزدوج . عندئذ لن تظهر صورتان متميزتان ، وبدلاً من ذلك سنرى نمط التداخل الموضح فى الجزء ب من الشكل ٢٥ – ١٩ .

وقد ذكرنا فى الجزء السابق مثالا آخر يوضح أن الضوء لا يسير دائما فى خطوط مستقيمة وذلك عند مناقشة الحيود بواسطة الشق الاحادى . وهناك أيضا أمثلة كثيرة لهذا النمط من السلوك .





شكل (٢٥ – ١٩)
إذا كان انفصال الشقين وعرضهما كبيرين بالمقارنة بالطول الموجى للضوء تتكون صورتان للشقين عند A و B. كما هو مبين فى (أ) . وعندما يكون عرض كل من الشقين وانفصالهما مقارنا بالطول الموجى للضوء يتكون نمط تداخل كالمبين فى الجزء (ب) . (بدون مقياس رسم) .



شكل (٢٥ - ٢٠)
ظل فلكة (وردة) نجمية الشكل . ترى شرائط التداخل بداخل الفتحة وحول الحافة الخارجية
(Courtesy Bausch & Lomb Optical Co.)

شرط رؤية التفاصيل

ويمثل الشكل ٢٥ - ٢٠ مثالا معقدا جدا ولكنه مثال نموذجى لهذا السلوك . ونحن نقابل مثل هذا الموقف دائما فى جميع الحالات التى يتكون فيها الظل . ويكون الظل حادا نسبيا فى حاله الأجسام الكبيرة . وتلاحظ أنماط التداخل أو الحيود قرب حافة الظل عندما يصبح الجسم صغيرا جدا . وقد لايرى الظل إطلاقا إذا كان حجم الجسم مقارنا بالطول الموجى للإشعاع المستخدم لأن نمط التداخل يصبح تقريبا لا نهائيا فى الكبر .

يجب أن نستنتج إذن أن من المستحيل الحصول على صور للأجسام التى تكون أبعاد تفاصليها مقارنة بالطول الموجى للإشعاع المستخدم . وهذا هو السبب فى أنه حتى أحسن الميكروسكوبات لا تستطيع أن تبين التفاصيل التى تكون أبعادها مقارنة بالطول الموجى للضوء أو أصغر منه . وبالرغم من أن الصيغة الدقيقة لقدرة الأجهزة البصرية على تحليل تفاصيل الأجسام الصغيرة جدا فوق مستوى موضوع هذا الكتاب ، فإن القاعدة التقريبية البسيطة هى أن التفاصيل الأصغر من بضعة أطوال موجية لا يمكن رؤيتها .

تنشأ بعض الظواهر المثيرة نتيجة للتداخل ، وسوف نذكر هنا واحده من أكثر هذه الظواهر إثارة . عندما يكون بنس ظلا فى حزمة ضوئية ضيقة يلاحظ وجود نهايات عظمى وصغرى للتداخل ، أى مناطق ساطعة ومظلمة ، قرب حواف الظل . ولكن إذا فحصنا مركز الظل الدائرى بعناية سنرى بقعة ساطعة صغيرة جدا . وفى

الحقيقة فإن تداخل الضوء المار حول البنس يسبب تكون بقعة ساطعة فى مركز الظل . وسوف تناقش هذه الظاهرة وظواهر أخرى مشابهة عند دراسة البصريات الفيزيائية .

٢٥ – ١٠ حيود أشعة اكس بواسطة البلورات

وجدنا فى الجزء ٢٥ – ٣ أن المسافة بين النهاية العظمى المركزية والنهاية العظمى ذات الرتبة الأولى فى تجربة الشق المزدوج ليونج تعطى بالعلاقة :

$$x = \frac{\lambda}{d} D$$

وبالتالى أن انفصال ، فإذا كانت x كبيرة فإن λ/d لا يمكن أن تكون صغيرة جدا . وعليه فإننا نرى أن انفصال الشقين يجب أن يكون أصغر ما يمكن لكى نتمكن من مشاهدة ظواهر التداخل .

بالمثل فى حالة هدب التداخل المتكونة بواسطة غشاء رقيق ، لا يجب أن يكون الغشاء سميكا جدا وإلا كانت الهدب متقاربة جدا من بعضها البعض بحيث لا يمكن رؤيتها بسهولة . ويجب ان نتذكر هنا أن المسافة بين الهدب تعتمد على المسافة التى يجب أن تتحركها على طول الغشاء ليتغير سمكه بمقدار $\lambda/2$. بالإضافة إلى ذلك فإن الزاوية المضبوطة التى ينظر بها الى الغشاء ذات أهمية فى حالة الأغشية السميكة . وللحصول على هدب منفصلة انفصالا واضحا لا يجب أن يكون سمك الغشاء أكبر كثيرا من الطول الموجى للضوء المستخدم .

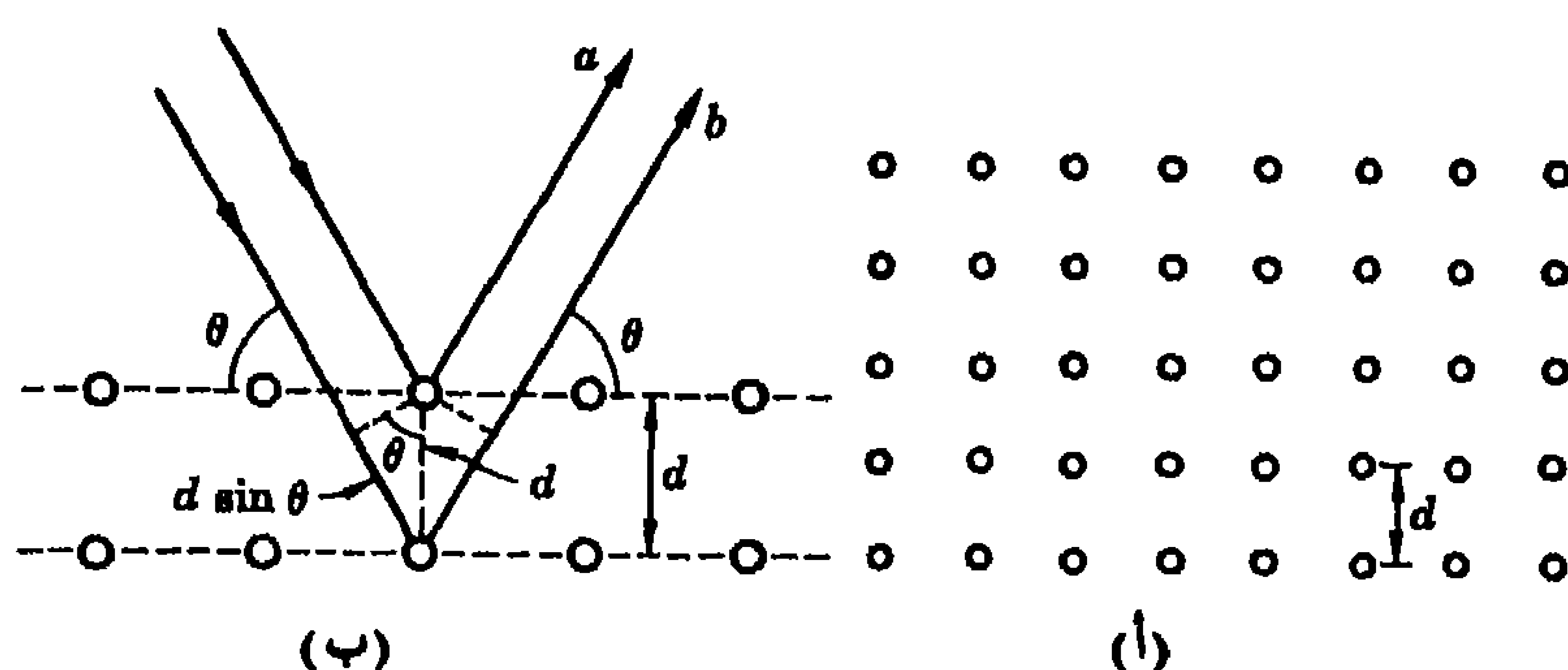
وتعتبر هذه الحقائق ذات أهمية خاصة إذا أريد الحصول على التداخل باستخدام أشعة اكس . وكما ذكرنا فى الفصل الثانى والعشرين ، فإن أشعة اكس هى موجات كهرومغنطيسية ذات طول موجى قصير جدا يقترب من 10^{-8} cm . وإذا أردنا إجراء تجربة الشق المزدوج ليونج ولكن باستخدام أشعة اكس يجب أن يكون الانفصال بين الشقين 10×10^{-8} cm ، أو 10 A° . وحيث أن قطر الذرات يتراوح بين 2A° و 5A° ، من الواضح أنه من المستحيل الحصول على شقين بهذه المواصفات . بالإضافة إلى ذلك ، من المسلم به أنه من المستحيل الحصول على أغشية منفصلة بمثل هذه المسافات الصغيرة إلا فى حالات خاصة جدا .

وبالرغم من ذلك فإن من الممكن الحصول على ظواهر تداخل باستخدام أشعة اكس . ويمكن تحقيق ذلك باستخدام بلورة كتلك المبين مقطعها فى الشكل ٢٥ – ٢١أ . وتوجد الذرات فى البلورة (الملح الصخرى على سبيل المثال) فى

مستويات متساوية البعد عن بعضها البعض . لنفرض أن المسافة بين كل مستويين فى البلورة هى d . وإذا سقطت حزمة من أشعة اكس على البلورة كما هو مبين فى الجزء ب من الشكل ٢٥ – ٢١ فإن الشعاع a المنعكس من الطبقة العليا من الذرات لن يقطع نفس المسافة التى يقطعها الشعاع b . إذا كانت المسافة الإضافية التى يقطعها الشعاع b هى $2d \sin \theta$. تساوى عددا صحيحا من الأطوال الموجية فإن الشعاعين يقوى كل منهما الآخر . وعندما يحدث هذا تعكس جميع الطبقات أشعة يقوى كل منها الآخر . لهذا فإن الانعكاس القوى سوف يحدث إذا كان :

معادلة براج

$$n\lambda = 2d \sin \theta \qquad (٢٥ - ٣)$$



شكل (٢٥ – ٢١) توجد الذرات فى البلورة فى مستويات متساوية البعد عن بعضها البعض . ويمثل الجزء (أ) مثالا لذرة بسيطة . عندما تعكس مستويات الذرات أشعة اكس كما هو مبين فى (ب) ، تسبب الأشعة المنعكسه ظواهر التداخل .

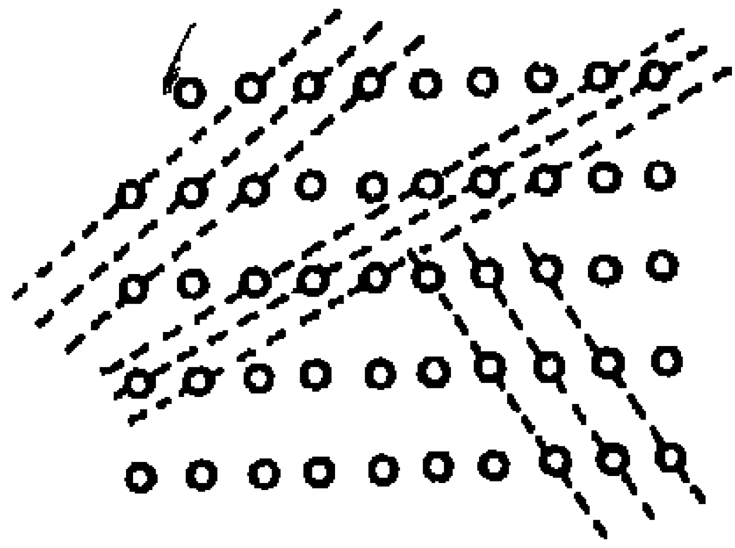
حيث n عدد صحيح . وتسمى هذه العلاقة **معادلة براج** نسبه إلى و.هـ. براج وابنه و.ل. براج اللذين استخدماها على نطاق واسع فى عام ١٩١٣ .

لاحظ أن المعادلة (٢٥ – ٣) تشبة معادلة المحزوز (٢٥ – ٢) ، ومع ذلك فإنها تختلف عنها بمعامل قيمتة 2 . بالاضافة إلى ذلك تعرف الزاوية θ بطريقتين مختلفتين فى هاتين الحالتين .

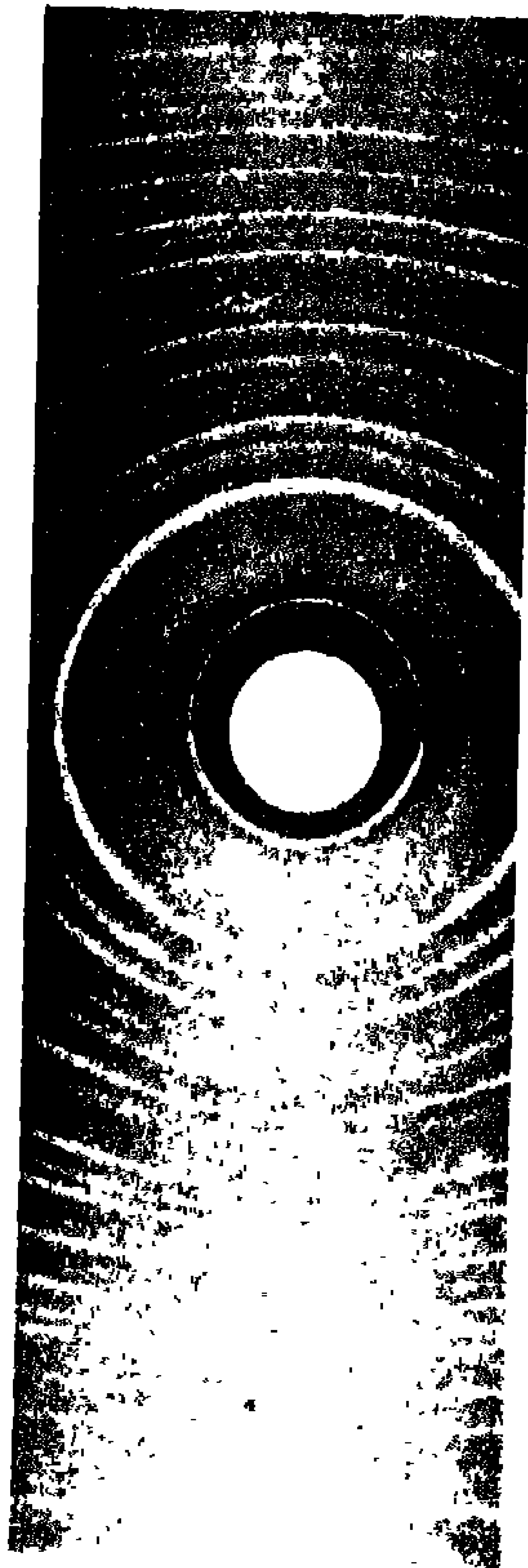
وقد أصبحت المعادلة (٢٥ – ٣) معادلة أساسية فى كثير من القياسات الأساسية .وعلى سبيل المثال اعتبر ما يحدث فى انعكاس براج من بلورة من الملح الصخرى . حيث أن المسافة بين طبقات الذرات فى الملح الصخرى يمكن إيجادها بمعلومية كثافة الملح الصخرى وكتلة ذراتة فإن المسافة d تعتبر معلومة فى هذه الحاله . وحيث أن كلا من n و θ يمكن قياسه فإن الطول الموجى لأشعة اكس يمكن إيجاده باستخدام المعادلة (٢٥ – ٣) وهذه هى إحدى الطرق التى بينت لنا أن الأطوال الموجية لأشعة اكس قريبة من 1 Å وبالطبع إذا كان الطول الموجى λ معلوما فإن المسافة d يمكن قياسها وهذا هو أساس مجال علم بلوريات أشعة اكس الذى يقاس فيه تركيب البلورات باستخدام أشعة اكس .

ولكن الأساليب التقنية الفعلية المستخدمة فى تعيين التركيب البلورى باستخدام أشعة اكس معقدة جدا . لاحظ وجود كثير من المستويات الممكنة لطبقات الذرات فى البلورة ، ويوضح الشكل ٢٥ - ٢٢ بعضا منها . ويصبح الموقف أكثر تعقيدا فى حالة البلورات ثلاثية الأبعاد . وحسب الطريقة التى تستخدم بها البلورة قد تتكون الصورة الفوتوغرافية لنمط الحيود من سلسلة من النقط أو مجموعة من الحلقات الدائرية أو الخطوط المتوازية وهكذا ، ويمثل الشكل ٢٥ - ٢٣ نوعين من الصور الفوتوغرافية التى يمكن الحصول عليها . وقد أخذت الصورة الموضحة فى الجزء أ بالسماح لحزمة من أشعة اكس بالنفاذ خلال بلورة أحادية ، بينما أخذت الصورة الأخرى بطريقة مشابهة باستعمال مادة متعددة البلورات . ويعتبر تفسير هذه الصور فى حد ذاته علما على درجة عالية من التعقيد .

ومع ذلك فان معظم معلوماتنا عن تركيب البلورات قد حصل عليها نتيجةلتحليل صور فوتوغرافية شبيهة بهذه الصور .



شكل (٢٥ - ٢٢)
هناك كثير من مجموعات الطبقات المتوازية من الذرات فى البلورة . ويوضح هذا الشكل ثلاثامن هذه المجموعات



(ب)



(أ)

شكل (٢٥ - ٢٣)
إذا أسقطت حزمة من أشعة اكس على بلورة أحادية نحصل على صورة تداخل لاو .
(ب) إذا استخدم المسحوق البلورى بدلا من البلورة الأحادية فإننا نحصل على نمط تداخل ديباى - شيرر .

ملخص

تستطيع الموجات أن تنحنى حول العوائق الى مناطق الظل الذى تكونه هذه العوائق . هذه الظاهرة تسمى الحيود وهى تنشأ نتيجة لخاصية تداخل الموجات .

تحدث ظواهر التداخل عند التقاء موجتين أو أكثر معا . تتداخل الموجتان متفقتا الطور أو متفاوتتا الطور بمقدار $n\lambda$ (حيث n عدد صحيح) تداخلا بناء ، ويحدث التداخل الاتلافى إذا كانت الموجتان متفاوتتى الطور بمقدار $180°$ أو $\frac{1}{2}\lambda$. ويحدث التداخل الاتلافى ، أيضا اذا كان فرق الطور $n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$ ، حيث n عدد صحيح .

يمكن الحصول على موجتين متماثلتين ، أى مترابطتين ، بتقسيم اضطراب موجى واحد إلى جزئين . فى تجربة الشق المزدوج ليونج تحدث الموجة الواحدة الساقطة على الشقين موجتين مترابطتين . عندئذ تتداخل كل من هاتين الموجتين مع الأخرى لتنتجا مجموعة من الهدب الساطعة والمظلمة . تعتمد مواضع الهدب على الطوا الموجى للضوء ، لذلك فإن من الممكن استخدامها لقياس λ .

يمكن الحصول على موجتين مترابطتين بالانعكاسات الجزئية لحزمة ضوئية واحدة على سطحين . فى مقياس التداخل لمايكلسون تسير الموجتان الناتجتان بهذه الطريقة فى مسارين مختلفين ثم تلتقيان سويا مرة أخرى . ويمكن إجراء قياسات المسافة بدقة عالية جدا بتغيير طول مسار احدى الموجتين . يمكن الحصول على الحزمتين الضوئيتين المتداخلتين أيضا بانعكاس حزمة ضوئية واحدة على سطحى غشاء رقيق أو فجوة رقيقه وحيث أن ظواهر التداخل تعتمد على الطول الموجى فان هدب التداخل تكون ملونة بدرجة عالية عند استخدام الضوء الأبيض .

طول المسار الضوئى المكافىء لمسافة قدرها d فى مادة معامل انكسارها n هو nd . تسير الحزمة الضوئية مسافة قدرها nd فى الفراغ فى نفس الزمن اللازم لكى تقطع مسافة قدرها n فى المادة .

يتكون محزوز الحيود من آلاف الشقوق المتوازية والمتقاربة من بعضها البعض . نمط الحيود المكون بواسطة محزوز الحيود أكثر حدة من نمط حيود الشق المزدوج بدرجة كبيرة . يستخدم محزوز الحيود فى المطياف لتحليل الضوء . وفى مثل هذا المطياف تتكون صور الشق (المعروفة باسم خطوط الطيف) عند الزوايا θ_n بالنسبة للحزمة الضوئية الاصليه ، وتعطى هذه الزوايا بالعلاقة $n\lambda = d\sin\theta_n$. يعطى الضوء ذو الطول الموجى λ والذى يسقط على محزوز حيود بعده البينى d صورا عند الزوايا θ_n ، حيث n عدد صحيح يمثل رقم الرتبة .

يحتوى الضوء المنبعث من الغازات على موجات ذات أطوال موجيه معينة فقط . ويعطى كل طول موجى خطا أو صورة فى المطياف . وتسمى هذه المجموعة من الخطوط بالطيف الخطى الساطع . ويحتوى الضوء المنبعث من الأجسام الصلبة المتوهجة على مدى مستمر من الأطوال الموجية يظهر فى المطياف على شكل شريط مستمر من الالوان . ويسمى هذا الطيف بالطيف المستمر .

يضع الحيود حاليا حدا معينا لقدرتنا على تبين رؤية التفاصيل فى الأجهزة البصرية وكقاعدة بسيطة يمكننا القول أنه من المستحيل رؤية تفاصيل أصغر من الطول الموجى للإشعاع المستخدم .

يتم تداخل أشعة أكس باستخدام البلورات . وفى هذه الحالة تعمل مستويات الذرات فى البلورة كأسطح عاكسة . تستخدم أنماط التداخل التى يحصل عليها بهذه الطريقة فى دراسة تركيب البلورات .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اكتمال هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى

١ – وصف تجربة موجة الماء لتوضيح ظاهرة الحيود .

٢ – إثبات علاقة الطور لموجتين متماثلتين متداخلتين تداخلا بناء وتداخلا إتلافيا .

٣ – شرح طريقة الحصول على الحزمتين المترابطتين فى تجربة يونج . توضيح لماذا تتداخل الحزمتان تداخلا بناء وتداخلا اتلافيا فى نقط مختلفة باستخدام الرسم التخطيطى . إثبات العلاقة $n\lambda/x = D/d$ لمواضع الهدب الساطعة باستخدام الرسم التخطيطى أيضا .

٤ -- استخدام نمط التداخل ذى الشق المزدوج لتحديد قيمة   إذا أعطيت معلومات كافية

٥ -- وصف تركيب وطريقة استخدام مقياس التداخل لمايكلسون بإيجاز .

٦ -- شرح سبب الحصول على التداخل باستخدام غشاء أو سفين رقيق . توضيح لماذا تكون هدب التداخل المتكونة باستخدام الضوء الابيض ملونة . حساب فرق السمك بين هدبتين ساطعتين أو مظلمتين متجاورتين فى سفين هوائى .

٧ -- ذكر ما هو محزوز الحيود وتوضيح كيف يستخدم فى المطياف ذى محزوز الحيود . شرح لماذا يشاهد السطوع عند الزوايا التى تحقق العلاقة $n\lambda = d \sin \theta_n$. توضيح العلاقة بين n ورتبة الصورة .

٨ -- شرح ماذا نعنى بخط الطيف . التفرقة بين الطيف الخطى الساطع والطيف المستمر .

٩ -- وصف ما يحدث لحزمة ضوئية تمر خلال شق عندما يصبح الشق ضيقا جدا . وجه اهتماما خاصا لما يحدث عندما يكون عرض الشق قريبا من λ . وصف أهمية هذه الظاهرة فى قدرتنا على رؤية تفاصيل الأجسام .

١٠ -- شرح مفهوم الكميات المختلفة فى علاقة براج . استنتاج هذه العلاقة بدراسة انعكاس الضوء على مستويات البلورة . توضيح لماذا يجب استخدام أشعة اكس وليس الضوء المرئى للحصول على ظواهر التداخل من مستويات البلورة .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من الآتى :

الحيود

التداخل البناء ، التداخل الإتلافى

موجتان متفقتا الطور ، موجتان متفاوتتا الطور ، موجتان متفاوتتا الطور بمقدار $180°$ أو $\frac{1}{2}\lambda$

تجربة الشق المزدوج ليونج ، العلاقة $\Delta = n\lambda$ للنهايات العظمى .

العلاقة $\Delta/d = x/D$

الهدب ذات الرتب الاولى والثانية والصفرية

مقياس التداخل لمايكلسون

طول المسار الضوئى المكافىء

حلقات نيوتن

محزوز الحيود ، المطياف ذو محزوز الحيود ، العلاقة $n\lambda = d \sin \theta_n$

خط الطيف ، الطيف الخطى ، الطيف المستمر

لا يمكن رؤية التفاصيل الأصغر من λ

معادلة براج

أسئلة وتخمينات

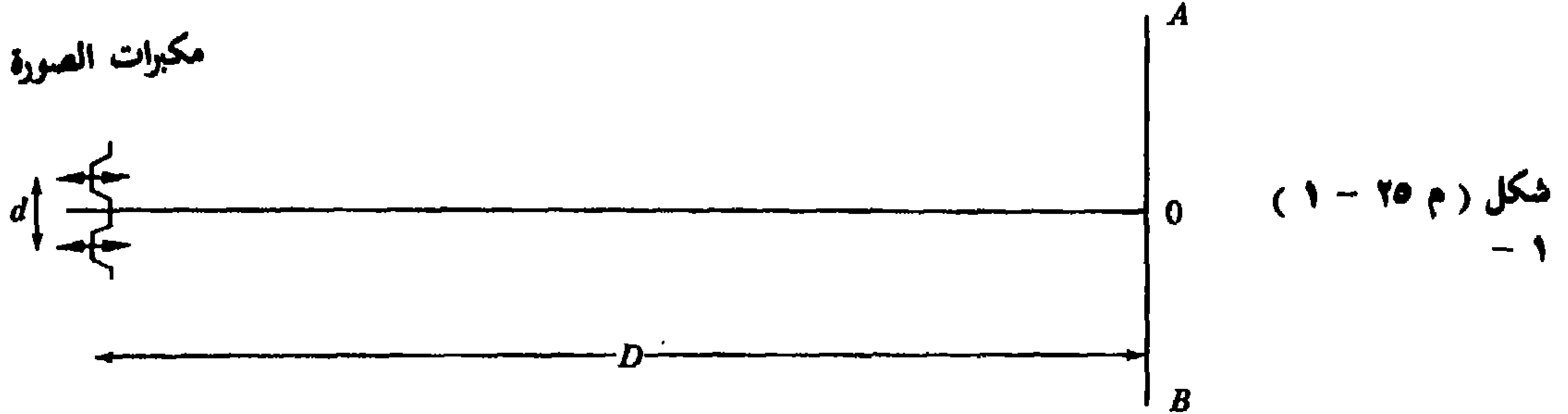
١ -- الجهازان المبينان فى الشكل م ٢٥ -- ١ متصلان بنفس المذبذب ، لهذا فإنهما يصدران موجتين صوتيتين متماثلتين . تحت أى الشروط يمكنك أن تلاحظ ظاهرة التداخل عندما تمشى على طول الخط AB ؟ ماذا يحدث اذا استبدل الجهازان بمصباحين كهربائيين ؟

٢ -- لماذا يستحيل الحصول على هدب التداخل فى تجربة الشق المزدوج اذا كان انفصال الشقين أصغر من الطول الموجى للضوء المستخدم ؟

٣ -- حور تجربة الشق المزدوج ليونج للحصول على تداخل الموجات الصوتية باستخدام جهاز واحد كمصدر للموجات .

٤ -- لماذا يعكس السطح الزجاجى أو المعدنى الذى يحمل غشاء رقيقا من الزيت فوقه قوس قزح من الألوان عندما ينعكس الضوء الأبيض منه ؟

٥ – توضع الأغشية الرقيقة على سطح العدسات المغلفة لآلات التصوير الثمينة لتقليل الانعكاس . افترض أن العدسة مغلفة بغشاء من مادة شفافة ($n = 1.3$) طول المسار الضوئى المكافىء لها $1250A°$. لماذا يقلل هذا الانعكاس من العدسة ؟ ما هى السمة الهامة الأخرى للغشاء المغلف لكى يكون ذا تأثير كبير ؟ لماذا يبدو الضوء المنعكس من العدسات المغلفة ملونا ؟



شكل (م ٢٥ – ١)
– ١

٦ – ترسب الأغشية الرقيقة جدا أحيانا على الألواح الزجاجية . ويمكن التحكم فى سمك الغشاء بملاحظة تغير لون الضوء الأبيض المنعكس من السطح عندما يزداد سمك الغشاء . اشرح ذلك .

٧ – تحلل الأغشية الزيتية الموجودة على سطح الماء الضوء الأبيض إلى ألوانه . هل هناك أى تشابه بين هذه الطريقة لتحليل الضوء الابيض إلى ألوانه وعمل المنشور ؟ أشرح ذلك .

٨ – اشرح العبارة التالية : الفرق فى السمك بين هدبتين ساطعتين فى نمط تداخل الغشاء الرقيق يساوى صفرا أو $\frac{1}{2}\lambda/n$ ، حيث λ الطول الموجى للضوء المستخدم ، n معامل انكسار الغشاء .

٩ – هل تتحسن قدره تحليل الميكروسكوب عند استخدام الضوء الأزرق بدلا من الضوء الاحمر ؟ اشرح ذلك .

١٠ – افترض أن لديك محزوز حيود خواصه مجهولة . كيف يمكنك استخدامه لتعيين الطول الموجى لخط طيف مجهول ؟

١١ – خذ قطعتين من الزجاج المسطح (شريحتى ميكروسكوب مثلا) ثم اضغطهما معا بطرق مختلفة وقدر درجة تقارب السطحين بمشاهدة الضوء المتداخل المنعكس . (يمكنك أن ترى نمط التداخل بسهولة فى غرفة مضاءة بشرط أن تضغط الشريحتين بدرجة كافية) .

١٢ – كيف يمكنك استخدام مقياس التداخل لمايكلسون لقياس معامل انكسار الهواء ؟

١٣ – عند النظر إلى عدسة مغلفة لآلة تصوير فى الضوء المنعكس تظهر هذه العدسة بنفسجية مع وجود نقبة ضاربة إلى الحمرة (ما جنتا) . فإذا كانت المادة المغلفة هى فلوريد الماغنسيوم ومعامل انكسارها 1.25 . قدر سمك الغشاء المغلف . (ق)

مسائل

١ – لنفرض أن المصدرين الصوتيين المبينين فى شكل م ٢٥ – ١ يبعثان موجتين متماثلتين متفقتى الطور وطولهما الموجى $\lambda = 50$ cm . عندما يتحرك شخص ما على طول الخط AB سيسمع نهايات عظمى وصغرى صوتيه . ما هو فرق المسار من المصدرين عند (أ) النقطة 0 ، (ب) النهاية العظمى الأولى بعد 0 ، (حـ) النهاية العظمى الثالثة ، (د) النهاية الصغرى الثالثة ؟

٢ – **طبقا لنص المسألة السابقة يبعث المصدران الصوتيان موجتين متفقتى الطور طولهما الموجى** $\lambda = 50$ cm. إذا كانت $D = 25$ m ، $d = 5.0$ m ، فعلى أى بعد من النقطة 0 على الخط AB تقع (أ) النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى (ب) النهاية الصغرى ذات الرتبة الأولى ؟

٣ – فى تجربة الشق المزدوج كان الانفصال بين الشقين 0.20 cm والمسافة بين الشقين والستار 100 cm . فإذا اتفقنا على أن موضع الهدبة الساطعة المركزية هو الصفر ، اوجد مواضع النهايات العظمى الثلاث الأولى على كلا جانبى النهاية العظمى المركزية . الطول الموجى للضوء المستخدم هو 5000 A° .

٤ – اوجد مواضع النهايات الصغرى الثلاث الاولى فى تجربة الشق المزدوج الموصوفة فى المسألة ٣ .

٥ – ما هو انفصال الشقين فى تجربة الشق المزدوج الذى يعطى نهاية عظمى ذات الرتبة الثانية على بعد 1.00 cm من البقعة الساطعة المركزية ؟ المسافة بين الشقين والستار هى 2.0 m والطول الموجى $\lambda =$ 500 nm

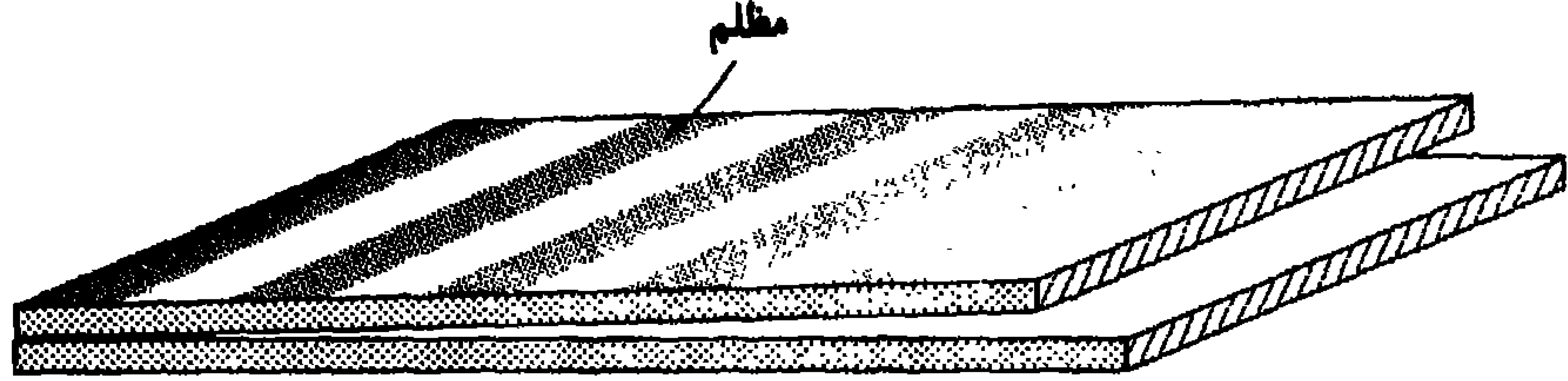
٦ – عند استخدام الضوء الصوديومى الأصفر ($\lambda =$ 589 nm) فى تجربة الشق المزدوج تقع النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى على بعد 0.030 cm من النهاية العظمى المركزية . وعند استبدال هذا الضوء بآخر طوله الموجى مجهول تتكون النهاية العظمى ذات الرتبة الثانية على بعد 0.040 cm من النهاية العظمى المركزية (أ) ما هو الطول الموجى للضوء الأخير ؟ (ب) فى أى منطقة من الطيف يقع هذا الضوء ؟

٧ – نظر شخص عموديا على لوحين زجاجيين متوازيين ومتلامسين ليستقبل ضوءاً طوله الموجى 500 nm (أخضر) منعكس عموديا تقريباً من السطحين . وعند فصل اللوحين ببطء يلاحظ الظلام عند مسافاتٍ انفصال معينة بين السطحين .

ما هى القيم الأربع الأولى لهذه المسافة ؟ **تلميح** : يلاحظ الظلام عندما يكون الانفصال بين اللوحين صفرا .

٨ – فى الشكل م ٢٥ – ٢ توجد الحافتان اليسرتان للوحين فى حالة تلامس . ما هى المسافة بين اللوحين بالتقريب عند آخر شريط مظلم على اليمين إذا كان الطول الموجى للضوء الازرق المستخدم هو $\lambda =$ 4400 Å ؟ افترض أن الحيز بين اللوحين مملوء بالهواء .

٩* – ينعكس ضوء أزرق طوله الموجى 400 nm من سفين هوائى موجود بين شريحتين زجاجيتين مستويتين ، وقد وجد أن المسافة بين كل هدبتين ساطعتين هى 0.50 cm . ما سمك السفين الهوائى على بعد 4.0 cm من خط تلامس اللوحين ؟ افترض أنك تنظر إلى السفين فى حالة السقوط العمودى للضوء .



شكل (م٢٥ – ٢)

١٠* – كرر المسألة ٩ اذا كان السفين مليئا بالماء وليس الهواء .

١١ – لتعيين خطوة لولب (قلاووظ) عالى الدقة يستخدم هذا اللولب فى تحريك إحدى مرآتى مقياس التداخل لمايكلسون . وقد وجد أن 1 rev من اللولب تؤدى إلى مرور 2023 هدبة . $\lambda =$ 5460 Å ، ضوء أخضر) فى مجال الرؤية . ما هى المسافة التى تتحركها المرآة عند دوران اللولب دورة واحدة ؟

١٢** – ثبتت فى إحدى أرجل مقياس التداخل لمايكلسون أنبوبة زجاجية مفرغة طولها 2.0 cm . سُمح للهواء بالدخول ببطء فى الأنبوبة فتغير مجال الرؤية من الظلام إلى السطوع إلى الظلام إلى السطوع .. وهكذا عددا من المرات قدره 2/0 (أى أن عدد الهدب المارة فى مجال الرؤية هو 2/0) . فإذا كان الطول الموجى للضوء الأصفر المستخدم هو $\lambda =$ 5790 Å ، فما هو معامل انكسار الغاز ؟

١٣* – تظهر هدب التداخل فى سفين رقيق جدا من البلاستيك عندما يسقط الضوء الأبيض عموديا عليه ، وكانت المسافة بين هدبتين زرقاوين متجاورتين ($\lambda =$ 4500 Å) ط 0.40 cm . إذا كان معامل انكسار البلاستيك هو 1.48 (أ) ما هو الفرق فى سمك السفين بين موضعى هاتين الهدبتين ؟ هناك إجابتان ممكنتان . (ب) كيف يمكنك أن تحدد الإجابة الصحيحة ؟

١٤* – تغلف عدسات آلات التصوير الغالية بأغلفة غير عاكسة ، وبالتحديد يغلف سطح العدسة بغشاء رقيق من فلوريد الماغنسيوم ($n =$ 1.25) . ما هو سمك الغشاء اللازم لكى يحدث تداخلا إتلافيا بين الضوء المنعكس من سطحى هذه الطبقة الغلافية عندما يستخدم ضوء طوله الموجى 5000A° ؟ (اثبت بطريقة كمية أن طبقة من اللوسيت ($n =$ 1.48) غير ملائمة لهذا الغرض ؟ **تلميح** : قارن كمية الضوء المنعكسة من اللوسيت بالكمية المنعكسة من الزجاج) .

١٥ – يحتوى محزوز حيود معين على 5000 خط فى كل سنتيمتر . عند أى زاوية يوجد الطيف ذو الرتبة الثانية لخط الصوديوم الأصفر ($\lambda = 5890A^\circ$) ؟

١٦ – يحتوى محزوز حيود معين على 4000 خط فى كل سنتيمتر . ما هو الانفصال الزاوى بين خطى الزئبق ($4358A^\circ$ والاخضر $5461 A^\circ$) فى (أ) الطيف ذى الرتبة الأولى ، (ب) الطيف ذى الرتبة الثانية ؟

١٧ – عند استخدام محزوز حيود معين وجد أن طيف خط الزئبق ($4358 A^\circ$) ذا الرتبة الثانية يقع عند الزاوية 30° تماما . عند أى زاوية يوجد الخط الأصفر ($5790 A^\circ$) ذو الرتبة الأولى ؟

١٨* – يستخدم محزوز الحيود العاكس عادة فى المطياف ذى محزوز الحيود . وهو عبارة عن مرآة يوجد على سطحها مجموعة من الخطوط العاكسة (تكافىء الشقوق فى المحزوز المنفذ) .

ويمثل الشكل ٢٥ – ٣ هذا الموقف حيث d هى المسافة بين مركزى خطين عاكسين متجاورين .اوجد معادلة هذا المحزوز ، أى الزاوايا التى توجد عندها النهايات العظمى للتداخل .

١٩** – هل يمكن تصميم محزوز بحيث يقع الخط الاحمر $6000 A^\circ$ ذو الرتبة الأولى على الخط البنفسجى $4000 A^\circ$ ذى الرتبة الثانية ؟ (ب) وإذا كان ذلك ممكنا ، اشرح كيف يتم ذلك ؟ (حـ) وإذا لم يكن ممكنا ، هل يمكن أن يتم بالنسبة لمجموعة أخرى من الرتب ؟ (د) وإذا أمكن ذلك ، بين كيف يتم ؟

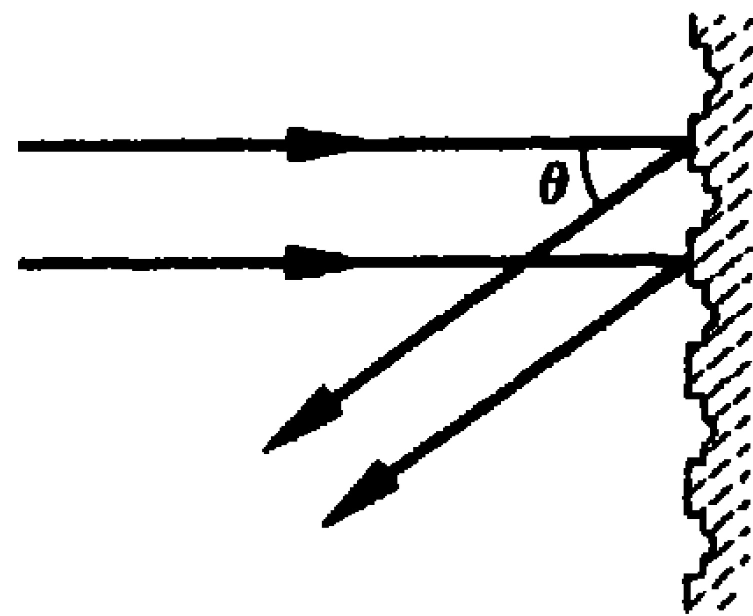
٢٠** – استخدم محزوز حيود (10,000 خط فى السنتيمتر) فى خزان كبير من الماء . عند أى الزوايا (فى الماء) يظهر خط الزئبق الازرق ($4358 A^\circ$) ؟

٢١** – فى كثير من الأحيان يكون سطح الفواصل المصنوعة من الصلب مموجا ويتكرر هذا التموج كل 10 cm أو حوالى ذلك . وتحت شروط مناسبة يعمل هذا النوع من الحوائط كمحزوز حيود عاكس بالنسبة للموجات الصوتية (انظر المسألة ١٨) . ما هو الطول الموجى للموجات التى تعطى نهاية عظمى ذات الرتبة الأولى عند الزاوية 30° بالنسبة للعمودى فى حالة السقوط العمودى ؟

٢٢ –** – يسقط ضوء طوله الموجى معلوم (600 nm) على شقين (المسافة بينهما مجهولة) مصحوبا بضوء آخر طوله الموجى مجهول . وقد وجد أن النهاية العظمى ذات الرتبة الرابعة للطول الموجى المعلوم تقع على الستار فى نفس موضع النهاية العظمى ذات الرتبة الخامسة للطول الموجى المجهول .ماهو الطول الموجى المجهول ؟

٢٣* – غمست مجموعة الشق المزدوج فى الماء ثم أضيئت باستخدام ضوء طوله الموجى 600 nm . وتكون نمط التداخل على ستار يبعد عن الشق المزدوج مسافة قدرها 2.0m فى نفس خزان الماء . على أى مسافة من النهاية العظمى المركزية تقع النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى على الستار إذا كان انفصال الشقين 0.040 cm ؟

٢٤ – انعكست حزمة من أشعة أكس من بلورة Na Cl بواسطة مستويات البلورة التى تبعد عن بعضها البعض مسافة قدرها 2.820 Å . وكانت زاوية سقوط الانعكاس القوى 40° (أ) ما هى الأطوال الموجية المختلفة لأشعة اكس ؟ (ب) كيف يمكنك تحديد الصحيح من هذه البدائل ؟



شكل (م٢٥ – ٣)

الفصل السادس والعشرون

مولد الفيزياء الحديثة

فى الفصول السابقة كانت هناك تفرقة كاملة بين الموجات والجسيمات وسنرى فى هذا الفصل أنه عند توافر شروط معينة تسلك الجسيمات سلوك الموجات وتسلك الموجات كالجسيمات . لقد فتح اكتشاف هذه الحقائق آفاقا جديدة للفيزيائيين .

سنناقش فى هذا الفصل تطوير هذه المفاهيم الجديدة كما سنقدم الأفكار الأساسية لنظرية النسبية ، ثم نطبق هذه المفاهيم على الذرة ونواتها فى فصول تالية .

٢٦ - ١ اكتشاف بلانك

بحلول عام ١٩٠٠ شعر كثير من العلماء أن معظم الاكتشافات الضخمة فى عالم الفيزياء قد تم بالفعل ولكى نكون واثقين بقيت بعض المسائل المزعجة تنتظر الحل ، ولكن كل القوانين الفيزيائية الأساسية للطبيعة كانت قد وجدت على مايبدو . ولكن هذا الرأى كان غير صحيح بالمرة كما سنرى فى هذا الفصل فكثير من المجالات الشاسعة فى السلوك الفيزيائى للطبيعة كان مجهولا حتى ذلك الوقت .

وقد ظهرت أول اشارة إلى أنه ليس كل شىء هادىء فى ميدان الفيزياء وذلك بطريقة غير متوقعة عام ١٩٠٠ ، فقد كان ماكس بلانك (١٨٥٨ - ١٩٤٧) مشغولا مع آخرين فى محاولة تفسير الإشعاع الذى تصدره الأجسام الساخنة غير العاكسة أو ما تسمى **بالأجسام السوداء** وقد دلت القياسات الدقيقة التى أجريت على شدة الضوء (وكذا الإشعاع تحت الأحمر وفوق البنفسجى) الصادرة عن أجسام متوهجة بالحرارة ، أن الشدة تتغير مع الطول الموجى كما فى الشكل ٢٦ - ١ . يلاحظ أن جزءا صغيرا فقط من الإشعاع الصادر له أطوال موجية فى المدى المرئى وأن أغلبه يقع فى مدى الأطوال الموجية الخاصة بالإشعاع تحت الأحمر (أو الحرارة) . علاوة على ذلك تدل المنحنيات على أنه بزيادة درجة الحرارة تتزحزح القيمة العظمى للإشعاع من تحت الأحمر نحو المرئى بما يتفق مع تجربتنا من أن جسما محمى لدرجة الابيضاض يكون أسخن مما لو كان فى درجة الاحمرار .

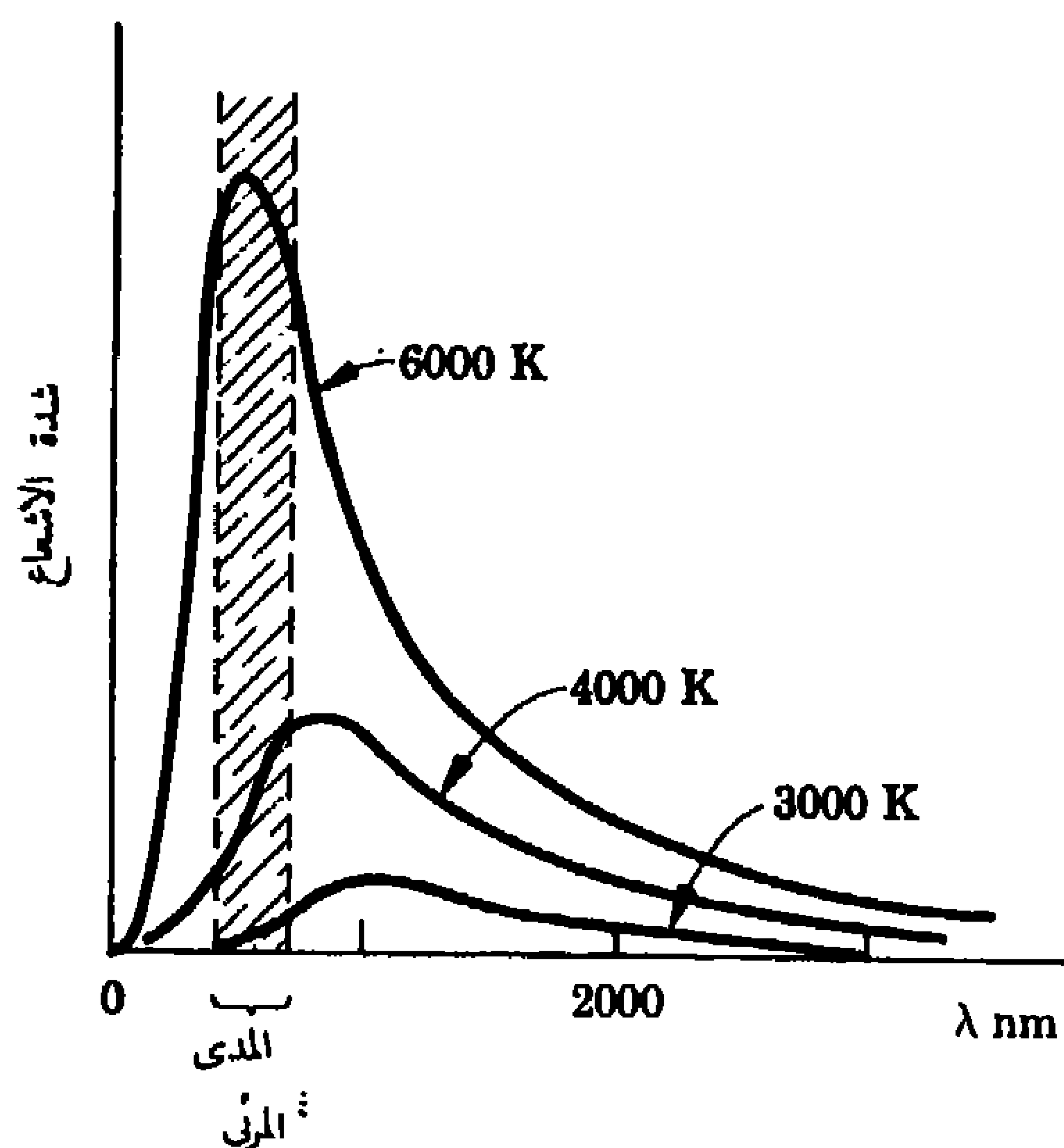
لكى نفسر هذه المنحنيات سنجد أننا نتساءل عن نوع الهوائى المرسل الذى يبعث الإشعاع الكهرمغناطيسى من الجسم الساخن . حيث أن الأطوال الموجية المعينة هنا قصيرة جدا لزم أن يكون تردد الشحنات المهتزة كبيرا جدا ، فعند الطول الموجى (1000 nm ، مثلا) يكون لدينا ،

$$\text{التردد} = \frac{c}{\lambda} = \nu$$

أو

$$\nu = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10^{-6} \text{ m}} = 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

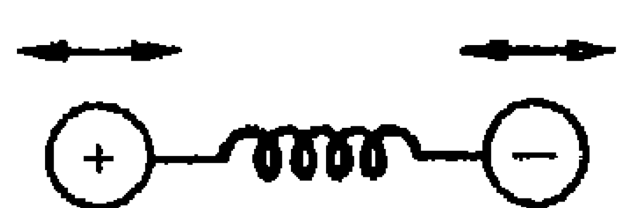
حيث استخدام الرمز ν (حرف « نيو » الاغريقى) للدلالة على التردد بدلا من f. ولاحظ كبر هذا التردد . ولا يمكن للشحنات أن تتذبذب بهذه السرعة إلا فى هوائى على مستوى حجم الذرات ونتيجة لهذا فمن المتوقع أن يصدر الإشعاع ك.م. بواسطة الشحنات المهتزة داخل الذرات والجزيئات التى تكون الجسم الساخن .



شكل (٢٦ - ١)
إشعاع الجسم الأسود . لكى نتمكن من المقارنة ستكون درجات الحرارة مناظرة لما يلى : 6000°K (درجة حرارة سطح الشمس) ، 4000°K (قوس كربونى) ، 3000 K (مصباح تنجستين ساخن جدا) .

هناك العديد من النماذج التى يمكن افتراضها لهذه المهتزات الذرية أو الجزيئية ، فلو كان الجسم مكونا ، على سبيل المثال ، من جزيئات قطبية ثنائية الذرة لأمكن تمثيل الجزىء المهتز كما فى الشكل ٢٦ - ٢ ، فالذرات مرتبطة معا بقوى زنبركية وحيث أن الجزىء قطبى لذا فذرتاه تحملان شحنات متساوية ومتعاكسة . وحين تقوم الذرات بالتذبذب جيئة وذهابا فإنها بذلك تفعل مثل الشحنات المهتزة على هوائى وبذلك تصدر إشعاعا ك.م. تردده ν_0 ، حيث ν_0ههو التردد الطبيعى لتذبذب نظام الزنبرك الجزيئى . هذه - على الأقل - هى الطريقة التى فكر بها بلانك ومعاصروه .

على أنه اتضح أن كل النظريات التى بنيت على هذا النموذج قد فشلت فى وصف الإشعاع الصادر من الأجسام الساخنة بدقة ، فقد كانت النظريات قادرة على الحصول على نسخ من المنحنيات التى فى الشكل ٢٦ - ١ عند الأطوال الموجية الطويلة فقط بينما أعطت تنبوءات خاطئة تماما عند القيم الصغيرة للأطوال الموجية . وقد تمكن ماكس بلانك من اكتشاف كيف يمكن تعديل النظرية حتى يتم الاتفاق بينها وبين التجربة ومن السهل فهم تعديل بلانك غير أنه من الصعب تبريره . وفى الواقع فإن التبرير الوحيد له هو أنه أعطى الإجابة الصحيحة فى النهاية . ولنر الآن ماذا افترض بلانك ليحصل على التوافق بين النظرية والتجربة .



شكل (٢٦ - ٢)
كلما تذبذب الجزئ ثنائى القطبية جيئة وذهابا فإنه يوحى بأنه يرسل أمواجا ك.م .

تعتمد سعة الاهتزازة لنظام كالمبين فى الشكل ٢٦ - ٢ - كما نعلم - على طاقة النظام وهذا الأمر صحيح لجميع المذبذبات سواء أكانوا كتلا معلقة فى زنبركات أم بندولا الخ . وفى جميع الحالات كلما زادت طاقة النظام ، كبرت سعة الاهتزازة .

وعلى الرغم من أن تردد الاهتزازة هو دائما ν_0 ، التردد الطبيعى للاهتزازة ، إلا أن السعة تتزايد بتزايد الطاقة . وقد وجد بلانك أن عليه أن يفترض أن النظام المهتز لا يمكنه الاهتزاز بأية طاقة ، وقد وجد بدلا من ذلك أن :

إفتراض بلانك المهتز ذا التردد الطبيعى ν_0 يمكنه أن يهتز فقط عند طاقات قدرها $h\nu_0$ ، $2h\nu_0$ ، $3h\nu_0$ .. وليس عند غيرها *

والكمية h هى ببساطة مقدار ثابت (وهى ليست سعة الاهتزازة) ومقدارها يجب أن يكون

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

اذا أريد أن يتم الاتفاق مع التجربه . ويسمى هذا الثابت الآن **بثابت بلانك** .

وهذا فى الحقيقة افتراض مذهل . إذ أنه يعنى أن المهتز يمكن أن يتذبذب بسعات معينة وليس بغيرها ، فعلى سبيل المثال ، حيث أن الطاقة الكلية للبندول هى mgH جيث H هو الارتفاع الذى يصل إليه ثقل البندول ، فإن بلانك ينص على أن mgH لا يمكن أن تكون إلا $h\nu_0$ ، $2h\nu_0$ ، الخ . ولا شيء بين هذه الكميات .

ولكى ندرك معنى هذا لنعتبر بندولا تردده الطبيعى $\nu_0 = 1$ cps وكتلة ثقل البندول 100 gr وعلى هذا فالارتفاعات التى يصل اليها الثقل عند تأرجحه ستكون ،

$$H_1 = \frac{h\nu_0}{mg} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})(1\ \text{s}^{-1})}{(0.10\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)} = 6.7 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

$$H_2 = 2H_1 = 13 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

$$H_3 = 3H_1 = 20 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

الخ . وليس هناك ارتفاعات عظمى للذبذبات يمكن ان تقع فى المنتصف .

لاحظ أن الفرق بين الارتفاعات المتتالية للذبذبات هى كما تنبأ بلانك لا تزيد عن 10^{-34} m . وهذا الفرق أضأل من أن يقاس ولهذا لا نستطيع أبدا أن نعرف إن كان بلانك محقاً بمجرد أن نلاحظ حركة بندول . فالفراغات بين الطاقات المسموحة أصغر من أن تقاس . وقد اتضح أن هذا الأمر صحيح لجميع الأنظمة المهتزة الشائعة

* الطاقة الصفرية غير مسموح بها لأن ذلك يؤدى إلى تعارض مع مبدأ عدم اليقين المذكور فيما بعد .

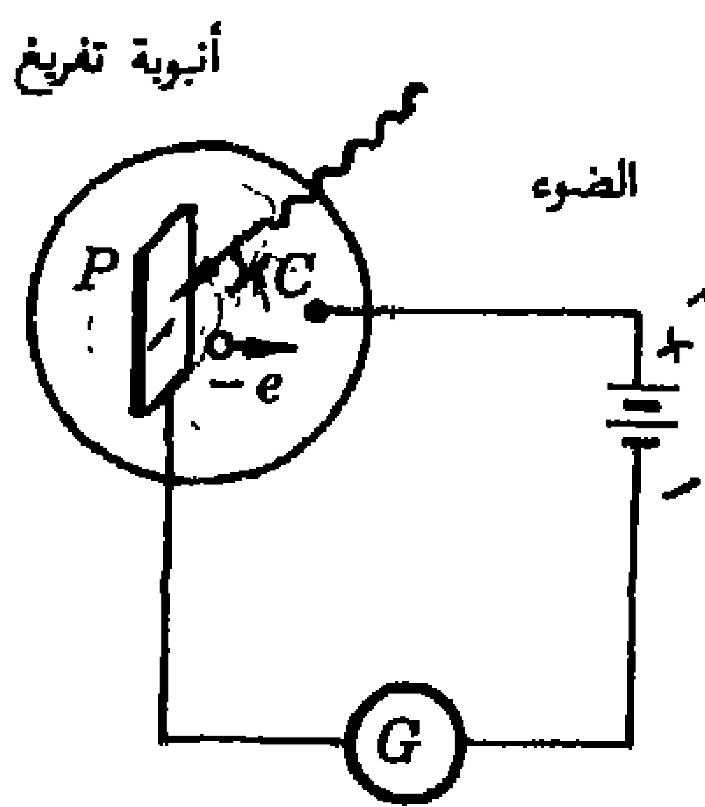
ومن ثم فنحن لا نستطيع أن نثبت أو ندحض فرض بلانك باستخدام أنظمة مهتزة من الطراز المستخدم فى المعامل .

ولذا فقد ووجه بلانك بموقف يثير الحيرة فهو قد حصل على نظرية مناسبة للإشعاع الصادر من جسم ساخن بشرط أن يكون مستعدا لاستخدام الفرض الذى حدد فيما سبق . أما اختبار هذا الفرض بالتجربة على أنظمة مهتزة أخرى فقد بدا مستحيلا ولهذا فقد رأى بلانك ومعاصروه أن تلك النتيجة كانت على درجة من الفضول ولكن صحتها مشكوك فيها . على أننا سنرى أنها قد تثبت صحتها وأهميتها القصوى .

٢٦ - ٢ استعمال اينشتين لمفهوم بلانك

عقب اكتشاف بلانك بخمسة أعوام وجد أن ظاهرة طبيعية أخرى تتضمن ثابت بلانك h . وقد تم هذا الاكتشاف على أيدى البرت أينشتين . فقد استطاع - كما سنرى - أن يشرح بالتفصيل تجربة أجراها أولا هاينرش هيرتز . وفى سبيل ذلك افترض أن الضوء له خواص الجسيمات مثلما له خواص الموجات . وقد صار هذا الفرض - كما تحقق فيما بعد - جزءا متكاملا من الفيزياء الجديدة .

لقد اكتشف هيرتز عام ١٨٨٧ (هو أيضا أول من أنتج واكتشف أمواج اللاسلكى) أن الضوء يمكن أن يقتلع الكترونات من لوح معدنى ونعرف الآن أن هذه ظاهرة عامة - فالطاقة الكهرمغناطيسية ذات الأطوال الموجية القصيرة تسبب انبعاثا للالكترونات من الجسم الصلب حين تسقط عليه . وهذا ما يسمى **بالتأثير الكهرضوئى** .



شكل (٢٦ - ٣)
حين يصطدم الضوء باللوح للخلية الضوئية تنبعث منه الالكترونات .

هناك تجربة لملاحظة التأثير الكهرضوئى وهى مبينة فى الشكل ٢٦ - ٣ . اللوح المعدنى P قد أدخل فى أنبوبة تفريغ زجاجية محكمة ومعة سلك صغير C هو المجمع . توصل هذه العناصر فى دائرة بها بطارية وجلفانومتر كما هو مبين . حين تغطى الأنبوبة بحيث لا يقع عليها أى ضوء فإنه لا يمر أى تيار بالجلفانومتر وذلك لأن جزء الدائرة بين P، و C داخل الأنبوبة ليس بينه أى اتصال حيث أن حيز الفراغ بين P ، C مقاومته بالضرورة لا نهائية .

إذا سقط ضوء ذو طول موجى قصير على اللوح P ،كالمبين ، فإن الجلفانومتر ينحرف ومن اتجاه سريان التيار يتضح أن الكترونات تغادر اللوح P، وتنتقل خلال أنبوبة التفريغ متجهة إلى المجمع C . وقد يظن للوهلة الأولى أن الضوء يقوم بتسخين

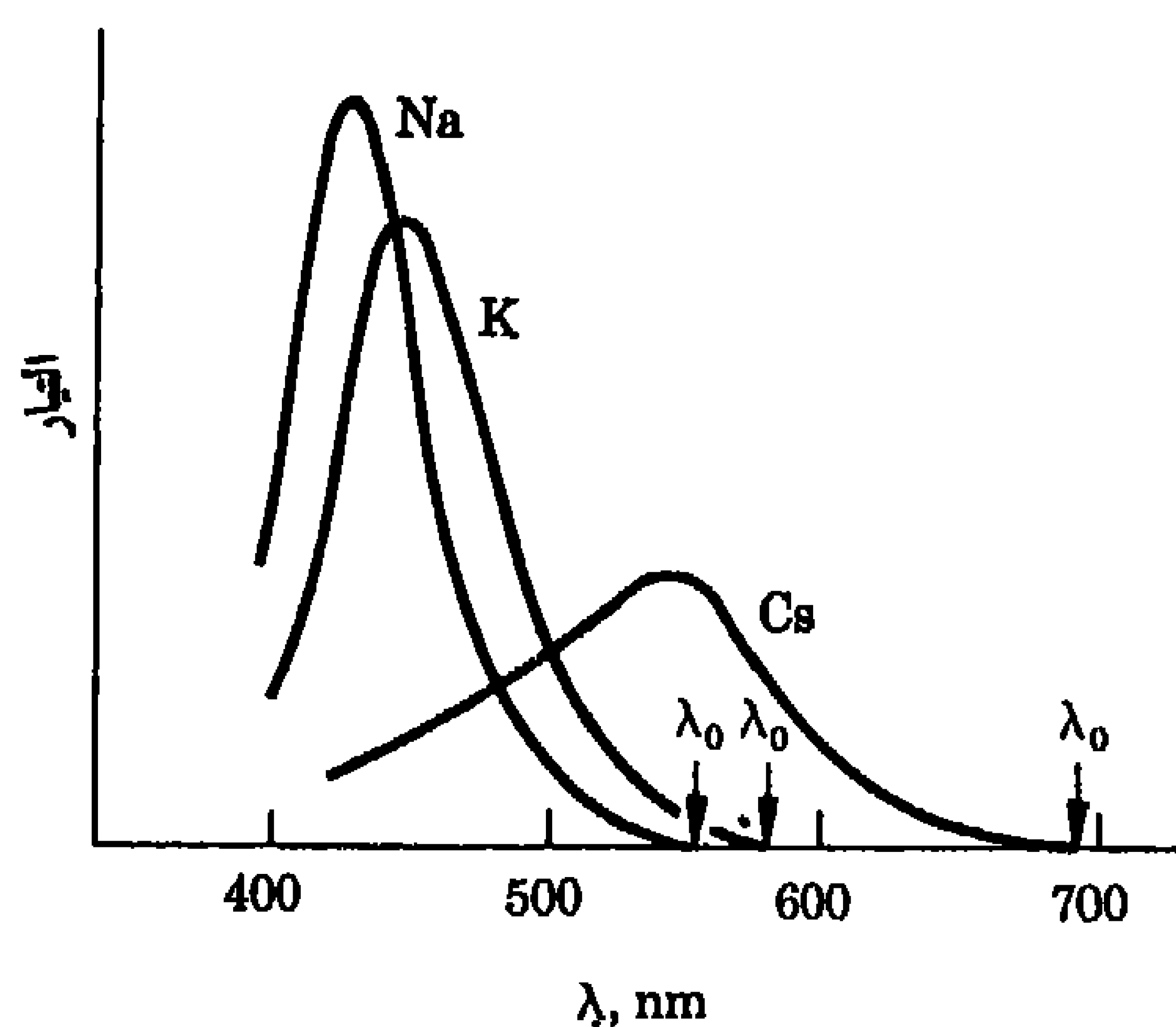
* اقترح أينشتين فى نفس العام ١٩٠٥ نظرية للنسبية وأعطى كذلك أول نظرية مكتملة للحركة البراونية وقد كان عمره وقتها ستة وعشرون عاما ويعمل كاتبا بإدارة براءات الاختراعات .

اللوح وحين يصير اللوح ساخنا بدرجة كافية يحدث الانبعاث الثرميونى كما فى الصمام الثنائى العادى . على أن الأمر ليس كذلك ، فقد أوضحت تجارب دقيقة أن التيار الالكترونى ينبعث من اللوح بمجرد أن يصل إليه الضوء بغض النظر عما إذا كان الضوء ضعيفا أم قويا وعما اذا كان اللوح ثقيلا أم لا . أى اننا لا نحتاج لأى تسخين .

وقد لوحظ بعد ذلك أن عدد الالكترونات المنبعثة من اللوح يتناسب طرديا مع شدة الضوء . فلو كانت البطارية التى فى الدائرة كبيرة بدرجة كافية لسحب كل الالكترونات المنبعثة إلى المجمع لكان تيار الجلفانومتر متناسبا مباشرة مع شدة الضوء . (ولهذا السبب بالذات يمكن استخدام مثل هذه الخلية الكهرضوئية فى قياس شدة الضوء) .

هناك سمة أكثر بريقا وهى المبينة فى الشكل ٢٦ – ٤ عندما ترسم العلاقة بين التيار المار فى الجلفانومتر مع الطول الموجى للضوء الساقط – مع الاحتفاظ بالشدة ثابتة – فإن الالكترونات لا تنبعث بضوء طوله الموجى أكبر من قيمة محددة هى λ_0 ، وهذا الطول الموجى يسمى **الطول الموجى الكهرضوئى المشرفى** وفى هذه الحالة لن تنبعث أية الكترونات مهما كانت شدة الضوء مادام الطول الموجى أكبر ولو بقدر ضئيل عن λ_0 . ومن جهة أخرى فان الالكترونات تبدأ فى الانبعاث بمجرد إشعال الضوء مهما كان هذا الضوء خافتا طالما أن الطول الموجى له أقصر من λ_0 . تعتمد هذه القيمة الخاصة λ_0 ، وهى الطول الموجى الحرج لانبعاث الالكترونات على المادة التى يصنع منها اللوح .

هناك أيضا ملاحظة شيقة تتضح عند عكس أطراف البطارية فى الدائرة التى فى الشكل ٢٦ – ٣ ، ففى هذه الحالة ستتنافر الالكترونات مع المجمع . وعندما يكون



شكل (٢٦ – ٤) يتغير التيار المار فى الدائرة فى شكل ٢٦ – ٣ مع الطول الموجى كما هو مبين هنا ، حيث سجلت بيانات ثلاثة معادن مختلفة هى الصوديوم والبوتاسيوم والسيزيوم ما معنى قيمة λ_0 المبينة لكل حالة ؟

فرق الجهد العكسى عبر الأنبوبة V فإن طاقة مقدارها Ve joules ستلزم الالكترون لكى ينتقل (صعدا) من اللوح إلى المجمع حيث e هى الشحنة الالكترونية ، أى أن الالكترون سيصل إلى المجمع فقط حين تكون طاقة حركته بعد قذفه من اللوح من الكبر بحيث أن $\frac{1}{2}mv^2$ تكون مساوية أو أكبر من Ve . ومعنى هذا أن طاقة حركة الالكترون حين يكون عند اللوح يجب أن تكون من الكبر بحيث تحمله صعودا إلى المجمع ذى القطبية المعكوسة .

عند إجراء هذه التجربة سنجد أن هناك جهداً للإيقاف وهو من الكبر بحيث يكفى بالضبط لإيقاف أى الكترونات لكى لا تصل إلى المجمع وهو يرتبط مع الطول الموجى للضوء الساقط بالمعادلة التالية ،

$$V_0 e = \frac{A}{\lambda} - B \qquad (١ - ٢٦)$$

حيث A و B هى ثوابت عددية . ونعلم مما قيل من قبل أن $V_0 e$ تساوى طاقة الحركة التى ينبعث بها أسرع الالكترونات من اللوح . ومن ثم يمكننا أن نكتب ،

$$V_0 e = (\mathrm{KE})_{\max}$$

أو ، بعد تعويض هذه الكمية فى المعادلة (٢٦ - ١) وإعادة ترتيب الحدود ،

$$\frac{A}{\lambda} = B + (\mathrm{KE})_{\max} \qquad (٢ - ٢٦)$$

لقد بذلت محاولات عديدة لتفسير كل هذه الملاحظات بدلالة الطبيعة الموجية للضوء وباءت جميعها بالفشل إذ أن أى تفسير موجى كان يجابه بعقبتين أساسيتين :

١ - كيف يمكن تخيل موجات تؤدى إلى وجود طول موجى مشرف ؟ فالضوء الذى له λ أقل قليلا جدا من λ_0 لا يختلف بشكل محسوس عن الضوء الذى له λ أكبر قليلا من λ_0 فى حين أن الأطوال الموجية الأقصر قليلا من λ_0 تجعل الالكترونات تنبعث . أما تلك التى هى أطول قليلا لا تفعل ذلك .

٢ - كيف يمكن لأضعف ضوء ممكن أن يجعل الالكترونات تنبعث بمجرد إشعاله ؟ فالطاقة الضوئية تبدو كما لو كانت تتركز لحظيا عند الكترون واحد وتجعله ينطلق حرا من الجسم الصلب . وهكذا ظهر أن الحاجة ماسة لمعالجة جديدة لتفسير الأثر الكهرضوئى وقد أقدم أينشتين على هذه الخطوة الجسورة والمبدعة .

لقد تمسك أينشتين بأفكار بلانك حول الطاقة المكماه للمذبذبات من أجل حل هذه المعضلة . فقد افترض بلانك ، كما نذكر أن مذبذبا تردده الطبيعى ν_0 يمكن أن يتخذ طاقات محددة فقط ، هى بالتحديد $h\nu_0$ ، $2h\nu_0$ ، .. ، حيث

$h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s . ويقال أن طاقات المذبذب **مكماه** وأن الطاقات الممكنة تختلف **بكم من الطاقة** $h\nu_0$. وقد رأينا فيما سبق أن الأشعاع ك.م. (بما فى ذلك الضوء) المنبعث من جسم ساخن يمكن اعتباره مبتعثا من مذبذبات ذرية وجزيئية هى مكونات الجسم .

وقد فكر أينشتين أنه لو كان لهذه المذبذبات أن تصدر إشعاعا بالطريقة التى وصفها بلانك فإن الطاقة يجب أن تبتعث على شكل تفجرات صغيرة أو حزم . وحيث أن الإشعاع ك.م ، مثلا ، يحمل طاقة ، فإن المذبذب الذى يصدر الضوء يجب أن يرسل طاقة ، ولكن حيث أن المذبذب لا يتخذ سوى طاقات محددة لذا فهو لا يستطيع قذف الطاقة بشكل مستمر وعليه أن يقذفها فى تفجرات قيمتها $h\nu_0$ لأن هذه الكمية هى الفاصل بين الطاقات المسموحة للمذبذب .

مفهوم الفوتون

ولكى تتحدد الأمور افترض مذبذبا طاقته $37h\nu_0$ لون أن المذبذب يفقد طاقة عن طريق إشعاع معين فستتغير طاقته إلى $36h\nu_0$، وليس الى أية قيمة أخرى بينية وذلك لأن طاقات المذبذب مكماة . وعلى هذا يجب أن يكون المذبذب قد قذف نبضة من الضوء أو أى إشعاع آخر بحيث تكون طاقة النبضة $h\nu_0$. تسمى هذه النبضة من الطاقة الكهرمغناطيسية **كم ضوئى أو فوتون** . ومن ثم نرى أن هناك بعض التبرير للتفكير فى أن شعاع الضوء يتكون من سلسلة من حزم الطاقة أو الفوتونات ، وأن كل فوتون له من الطاقة ما قيمتة $h\nu_0$.
وهكذا افترض اينشتين الصفة التالية للضوء :

> يتكون شعاع الضوء الذى طوله الموجى λ (**وتردده** $\nu = c / \lambda$)**من فيض من الفوتونات ويحمل كل فوتون طاقة قدرها** $h\nu$.

سنرى فى المستقبل كيف أن طاقة الفوتون مرتبطة بتركيب الذرات والجزيئات . ولنطبق الآن نموذج أينشتين للشعاع الضوئى على الأثر الكهرضوئى .

إذا كان الضوء يتكون فعلا من جسيمات ضئيلة من الطاقة ، فإن هذه الكمات أو الفوتونات ستصطدم مع الالكترونات المنفردة مثلما يصطك شعاع الضوء بالمادة . عندما تكون طاقة الفوتون أكبر من الطاقة اللازمة لاقتلاع الكترون ليتحرر من المادة فإن الالكترونات تبتعث فى نفس اللحظة التى يشغل فيها الضوء ، وعندما تكون طاقة كم الضوء أو الفوتون أقل من تلك القيمة فإنه لن يبتعث أى الكترون مهما كانت شدة الضوء . (إن فرصة اصطدام فوتونين بنفس الالكترون فى نفس اللحظة منعدمة عمليا) . ومن أول وهلة يتضح أن الطاقة اللازمة لاقتلاع الالكترون خارج اللوح هى بالضبط طاقة كم من الضوء له طول موجى مشرفى . ومن ثم فإن دالة الشغل ϕ وهى

كمية الشغل اللازم لاقتلاع الكترون ليصبح حرا خارج الجسم الصلب هى كما ناقشنا فى الفصل الثانى والعشرين كما يلى ،

$$\phi = \frac{hc}{\lambda_0} = h\nu_0$$

فى حالة ما إذا كان لكم الضوء طاقة أكبر من هذا ، أى عندما تكون λ أصغر من λ_0، فإن الالكترون لا ينفلت من اللوح فحسب ولكنه سيكتسب طاقة حركة إضافية . ومعنى هذا أن طاقة الفوتون hc/λ ستفقد جزئيا فى بذل الشغل ϕ لجعل الالكترون حرا ويظهر باقى الطاقة كطاقة حركة للالكترون ومن ثم يمكننا أن نكتب ،

$$\frac{hc}{\lambda} = \phi + \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad (\text{٢٦ – ٣})$$ المعادلة الكهرضوئية

لاحظ أن المعادلة (٢٦ – ٣) هى نفسها المعادلة ٢٦ – ٢ . والعلاقة التجريبية بين الطول الموجى وطاقة أسرع الالكترونات تتضح على الفور إذا اعتبر الضوء مكونا من كمات من الطاقة أو فوتونات . علاوة على ذلك فإنه حتى الثوابت التى تنبأت بها المعادلة ٢٦ – ٣ ، وهى **المعادلة الكهرضوئية** هى نفس الثوابت التى أوجدتها التجربة . نلاحظ أيضا أن الأطوال الموجية الأكبر من λ_0 للضوء لن يكون لديها ما يكفى من الطاقة لتحرير الالكترونات من المادة أى لن تبتعث منها أية فوتو الكترونات وهكذا يصبح لكل تفاصيل الأثر الكهرضوئى معنى اذا ما قبلنا اعتبار موجات الضوء ذات الطول الموجى λ على أنها كمات طاقة أو فوتونات طاقتها $hc/\lambda = h\nu$

مثال توضيحى ٢٦ – ١ عندما يسقط ضوء ذو طول موجى 5×10^{-5} cm على سطح معين فإن جهد الإيقاف يكون 0.6V . ما هى دالة الشغل لهذه المادة ؟

طريقة الحل . نستفيد مباشرة من المعادلة الكهرضوئية (٢٦ – ٣) ، وباستخدام وحدات SI نجد أن ،

$$\frac{(6.62\times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})(3\times 10^{8}\ \text{m/s})}{5\times 10^{-7}\ \text{m}} = \phi + (0.6\ \text{V})(1.6\times 10^{-19}\ \text{C})$$

حيث حلت V_0e محل $\frac{1}{2}mv^2$. والآن بحل المعادلة سعيا وراء ϕ نجد أن ،

$$\phi = 3\times 10^{-19}\ \text{J} = 1.9\ \text{eV}$$

معامل التحويل بين Joules ، electronvolts هو شحنة الالكترون كما قد تذكر . ودالة الشغل لمعظم المعادن تكون أكبر من هذه القيمة عدة مرات . على أن دالة الشغل للعديد من الأكاسيد والمركبات المعقدة تقع فى حدود هذه الكمية .

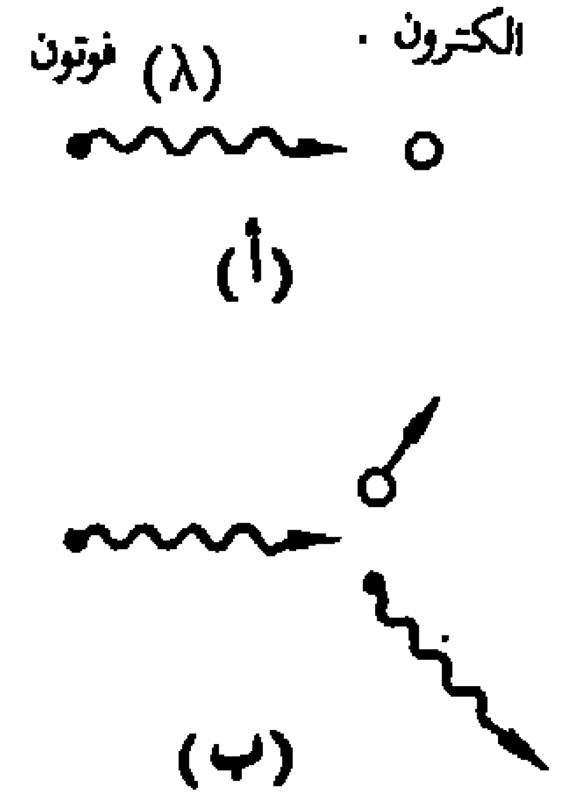
٢٦ - ٣. ظاهرة كومتون

لما كان الضوء وأشعة X كلاهما من الموجات الكهرمغناطيسية ، لذا فإن مفهوم الفوتون يجب أن ينطبق على أشعة X بالمثل ، وقد تمت البرهنة على وجود فوتونات أشعة X على أيدى أ.هـ. كومتون عام ١٩٢٣ لأول مرة . فقد لاحظ أنه عند سقوط شعاع من أشعة X أحادية اللون ، أى التى بها طول موجى واحد ، على كتلة من الجرافيت فانه يلاحظ استطارة نوعين من أشعة X من على تلك الكتلة بحيث أن معظم هذه الأشعة كان متطابقا فى الطول الموجى مع الأشعة الساقطة به ويمكن تفسير هذا على النحو التالى : يقوم المجال الكهربائى المتذبذب فى الشعاع الساقط بجعل الشحنات التى بداخل الذرات تتذبذب بنفس تردد الموجة . وتعمل هذه الشحنات المهتزة عمل هوائيات تشع موجات لها نفس التردد والطول الموجى ، ومن ثم تكون أشعة X المستطارة عبارة عن موجات أعيد إشعاعها بواسطة الشحنات الذرية المهتزة .

وبالإضافة إلى هذه الأشعة الشديدة نسبيا من أشعة X المستطارة فإن هناك نوعاً آخر من أشعة X المستطارة ذات طول موجى أطول قليلا . ويتغير الطول الموجى الحقيقى لهذه الأشعة الشاذة بطريقة محكمة وبسيطة نسبيا ، اعتمادا على الزاوية التى تستطار بها . ولم يبد من الممكن تفسير وجود هذه الأشعة باستخدام الصورة الموجية لأشعة X ببساطة .

شكل (٢٦ - ٥)
يصطدم الفوتون فى ظاهرة كومتون مع الكترون ، بحيث يكون هناك حفظ للطاقة وكمية التحرك .

وقد عرض تفسير بسيط لهذه الظاهرة بواسطة كل من كومتون وب . ديباى فى وقت واحد . لقد اعتبرا أن الشعاع من أشعة X يحتوى على فوتونات طاقة كل منها $h\nu$. وأن الفوتون يصطدم مع الالكترون مثلما تصطدم كرتان كما فى الشكل ٢٦ - ٥ ، ثم يقوم الفوتون بإعطاء جزء من طاقتة للالكترون ويرتد مبتعدا كما فى الجزء (ب) من الشكل . وحيث أن طاقتة الآن قد أصبحت أقل فإن طوله الموجى يكون أطول .



وقد عولجت المسألة بعد ذلك رياضيا تماما كما تعالج مسألة التصادم المرن لكرتين ، أى أن كلًا من الطاقة وكمية التحرك يجب أن يحفظا ، ولذا ،

الطاقة قبل التصادم = الطاقة بعد التصادم

و كمية التحرك قبل التصادم = كمية التحرك بعد التصادم

يمكن بعد ذلك حل هاتين المعادلتين مباشرة للحصول على الفقد فى طاقة الفوتون كدالة فى الزاوية التى يستطار بها . ويمكن استخدام النتيجة لحساب الطول الموجى للفوتون المستطار وذلك باستخدام حقيقة أن طاقة الفوتون هى hc/λ . وبعد أن يتم هذا سنجد أن الأطوال الموجية المحسوبة للفوتونات المستطارة تنطبق تماما مع القيم

المقاسة . وهذا أيضا يعتبر تأكيدا حاسما على الخواص الجسيمية للأمواج الكهرمغناطيسية .

٢٦ - ٤ فروض النسبية

وضع البرت اينشتين فى نفس العام (١٩٠٥) الذى قدم فيه نظريته عن التأثير (الكهرضوئى) الخطوط العريضة لنظريته الشهيرة عن النسبية . وهذه النظرية تعتبر مثالا رائعا على الاستنتاجات الهامة من التحليل الواضح للحقائق التجريبية . لقد أدرك أينشتين النصين التاليين على أنهما حقائق تجريبية :

الفرضان

١ - أن سرعة الضوء فى الفراغ لها نفس القيمة دائما عند قياسها ($c = 2.998 \times 10^8$ m/s) بغض النظر عن سرعة المصدر الضوئى نفسه أو عن حركة الملاحظ (يفترض بالطبع أن القياسات كانت دقيقة)

٢ - لا يمكن قياس السرعات المطلقة وإنما تتحدد فقط السرعات بالنسبة لجسم آخر .

هذان هما الفرضان الأساسيان لنظرية النسبية لأينشتين .

من المستحيل إثبات هذين الفرضين مباشرة . فهما محط إجماع كل الحقائق التجريبية المعروفة . ونحن نعتبر أنه من الممكن - رغم قلة الاحتمال - أن بعض التجارب قد تؤدى أحيانا إلى دحض أحد هذين الفرضين . ولكنهما مؤيدان بعدد كبير من المحاولات الفاشلة لدحضهما . بالإضافة إلى هذا سنرى أنهما يؤديان إلى استنتاجات هائلة تم التحقق منها بالتجربة .

ربما احتاج الفرض الثانى إلى بعض التفسير . من السهل قياس السرعات النسبية للأجسام فمقياس السرعة فى السيارة يدلنا على سرعة حركة السيارة بالنسبة للطريق وهذه السرعة ليست مطلقة ، فالأرض تتحرك نتيجة لدورانها حول محورها وأيضا حول الشمس . وبمعرفة هاتين السرعتين يمكن عند الطلب إيجاد سرعة السيارة بالنسبة للشمس .

ولكن الشمس نفسها تتحرك فى مجرتنا ، درب التبانة ، ومركز المجرة أيضا يتحرك بالنسبة لنجوم أكثر بعدا ، ويبدو كما لو كان مستحيلا أن نعرف سرعة محددة مطلقة لجسم ما لأن كل شيء يتحرك ويمكننا فقط النص على مقدار سرعة أحد الأجسام بالنسبة لجسم آخر .

هناك طريقة أخرى للنص على الفرض الثانى مما يعطينا لمحة عن أهميته الأساسية ، وعادة ما يقدم هذا النص البديل بدلالة مناطات الإسناد . **ومناط الإسناد** هو أى نظام للإحداثيات تجرى القياسات بالنسبة إليه . فموضع الأريكة مثلا ، وكذا المنضدة والكراسى يمكن وصفة بالنسبة لجدران الغرفة . وتكون الغرفة فى هذه الحالة هى نظام أو مناط الإسناد المستخدم . أو هب أن ذبابة تقف على زجاج سيارة متحركة . يمكننا وصف موضع الذبابة فى السيارة باستخدام جدران السيارة كمناط للإسناد ، ومن ناحية أخرى يمكن وصف موضع سفينة فضاء بالنسبة لمواقع نجوم بعيدة ويكون نظام الإحداثيات المبنى على هذه النجوم هو مناط الإسناد . تعريف

يمكن النص على الفرض الثانى بدلالة مناطات الإسناد كما يلى :

٢ – تكون قوانين الطبيعة الأساسية هى نفس القوانين* فى جميع مناطات الأسناد المتحركة بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض .

غالبا ما يختصر هذا النص باستخدام اصطلاح مناط الإسناد القصورى . **ومناط الإسناد القصورى** هو نظام للإحداثيات ينطبق فيه قانون القصور : يبقى الجسم الساكن فى حالة سكون مالم تؤثر عليه قوة غير متوازنة فتجعله يتسارع ، كما تنطبق أيضا قوانين الطبيعة الأخرى على هذا النظام . ويمكن بتقريب جيد اعتبار أن جميع نظم الإسناد المتحركة بسرعة ثابتة بالنسبة لنجوم بعيدة على أنها مناطات قصورية .

٢ – تكون قوانين الطبيعة الأساسية هى نفسها فى جميع مناطات الإسناد القصورية

يمكنك فهم العلاقة بين هذين النصين المختلفين للفرض الثانى وذلك باعتبار ما يلى . حين نقول أن السرعات النسبية هى فقط التى يمكن قياسها فإنما نفترض انعدام الانحياز فى مناطات الإسناد . سفينة الفضاء مثلا قد تكون متجهة إلى القمر بسرعة تبلغ 10^5 km/day بالنسبة للقمر . ومن الصحيح أن القمر أيضا يتجة نحو السفينة بسرعة 10^5 km/day بالنسبة للسفينة . فحقيقة أن أحدهما يتحرك بالنسبة للآخر من السهل توكيدها ولكن كلا النصين متكافئان ولا يمكن أن يقال على أى من الجسمين أنه فى حالة سكون .

افترض ، مع ذلك ، أن أحد قوانين الطبيعة يعتمد على سرعة مناط الإسناد وأن الأشخاص الموجودين بداخل سفينة الفضاء يمكنهم الإفادة من هذا القانون للحصول

---

* يمكن التعبير عن قانون نيوتن الثانى مثلا بأنه $F = ma$. فى أى من المناطات ولكننا سنرى مع ذلك أن m (أو F أو a) قد لا يكون لها نفس القيمة فى كل مناط .

على مؤشر لسرعتهم . كما يستطيع الأشخاص الموجدون فوق القمر فعل نفس الشيء . ستكون السرعتان المقاستان مختلفتين . ونتيجة لهذا سيكونون قادرين على أكثر من مجرد قياس سرعتهم النسبية ، ففى الواقع سيمكنهم القانون من إقامة تسجيل مطلق للسرعات . ولكن هذا يناقض الفرض الثانى ، ولذا فإننا نستنتج أن كل قوانين الطبيعة يجب أن تكون هى نفسها فى جميع مناطات الإسناد القصورية .

٢٦ – ٥ c هى الحد الأعلى للسرعة

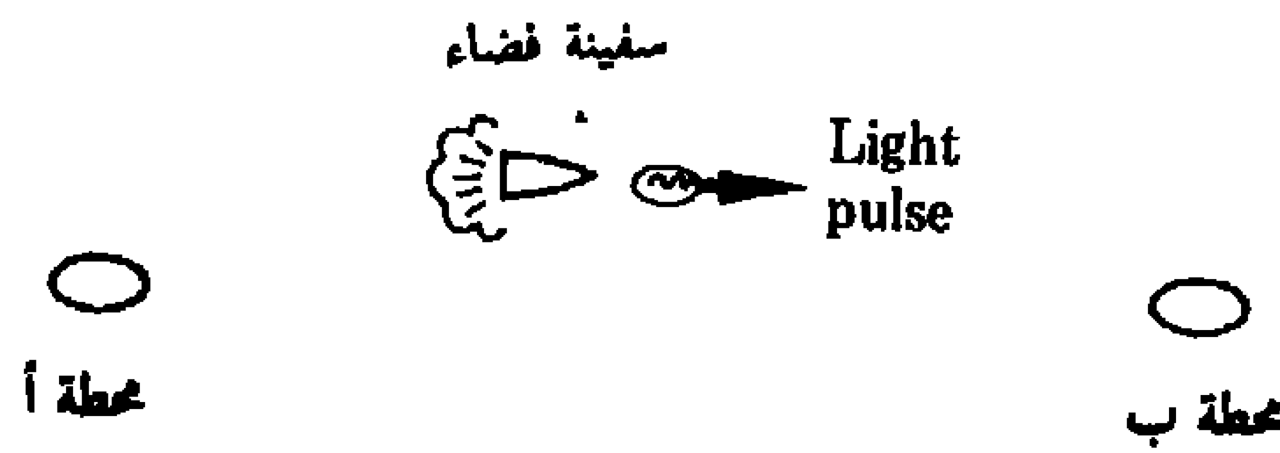
لو أننا صدقنا أينشتين لأمكننا أن نثبت بالمنطق وحده أن :

لا يمكن تعجيل جسم مادى الى سرعات تزيد على سرعة الضوء فى الفراغ .

يمكن تصوير صحة هذا النص بسهولة بالطريقة البسيطة التالية . سنثبتة بالطريقة المسماة **إثبات الخطأ** وفيها ندحض اقتراحا ما (بأن جسما يمكنه الانتقال بسرعة أكبر من c فى هذه الحالة) . وذلك ببيان أن هذا الأقتراح يؤدى إلى نتيجة معروفة وزائفة (وهى أن المشاهد سيقيس قيمة مختلفة عن c لسرعة الضوء فى هذه الحالة) .

افترض أن لدينا محطتين فى الفضاء هما A و B كما فى الشكل ٢٦ – ٦ . يقوم الملاحظون القصوريون عند A و B بأمر ركاب سفينة الفضاء باتباع خط مستقيم لمسارهم بين A و B ، وعلى السفينة أن تنتقل بأقصى سرعة ثابتة لها وأن ترسل إشارة ضوئية من مقدمتها نحو B عندما تمر بالمحطة A . من الطبيعى أن كلا من A و B وهما شركاء فى العمل سيمكنهم تحديد سرعة السفينة وذلك بتوقيت طيرانها من A الى B . والآن لنتقدم بالفرض الزائف بأنهم وجدوا أن سرعة السفينة هى $2c$.

لقد أرسلت السفينة نبضة ضوئية عند مرورها بالمحطة A ، وحيث أن قوانين الطبيعة يجب أن تنطبق على الملاحظين القصوريين الثلاثة جميعهم (A و B و الشخص الراكب فى السفينة) ، لذا وجب أن تسلك نبضة الضوء بطريقة طبيعية بالنسبة لكل منهم ، وبشكل خاص يجب أن تسبق نبضة الضوء السفينة وأن تصل إلى المحطة B قبل السفينة . ولهذا فإن A و B وهما تعملان معا ستجدان أن نبضة الضوء تتحرك أسرع من السفينة . ولكنهما قاسا سرعة السفينة ووجدا أنها $2c$ ، وعلى



شكل (٢٦ – ٦)
ما هى السرعة القصوى التى تمر بها السفينة بين المحطتين الفضائيتين ؟

ذلك فيجب أن تكون سرعة النبضة أكبر من $2c$. وهذه نتيجة مستحيلة تماما لأنها تتنافى مع حقيقة أن كل الملاحظين سيحصلون على سرعة للضوء مقدارها c فقط . ومن ثم نستنتج أن اقتراحنا الأصلى كان زائفا ، وأن سفينة الفضاء لا يمكن أن تتحرك بين A و B بسرعة مقدارها $2c$.

ولابد أن تؤدى هذه التجربة دائما إلى هذا التناقض طالما أصررنا على أن سرعة السفينة تربو على c . وعليه فإننا نستنتج أن سفينة الفضاء لا يمكن أن تزيد سرعتها عن سرعة الضوء المقاسة وهى c . ويمكن بالفعل التمادى فى هذا الخط من التحليل ليشمل كل الأجسام المادية والنبضات التى تحمل الطاقة . ويمكن نتيجة لهذا النص على أن :

توجد سرعة محدودة

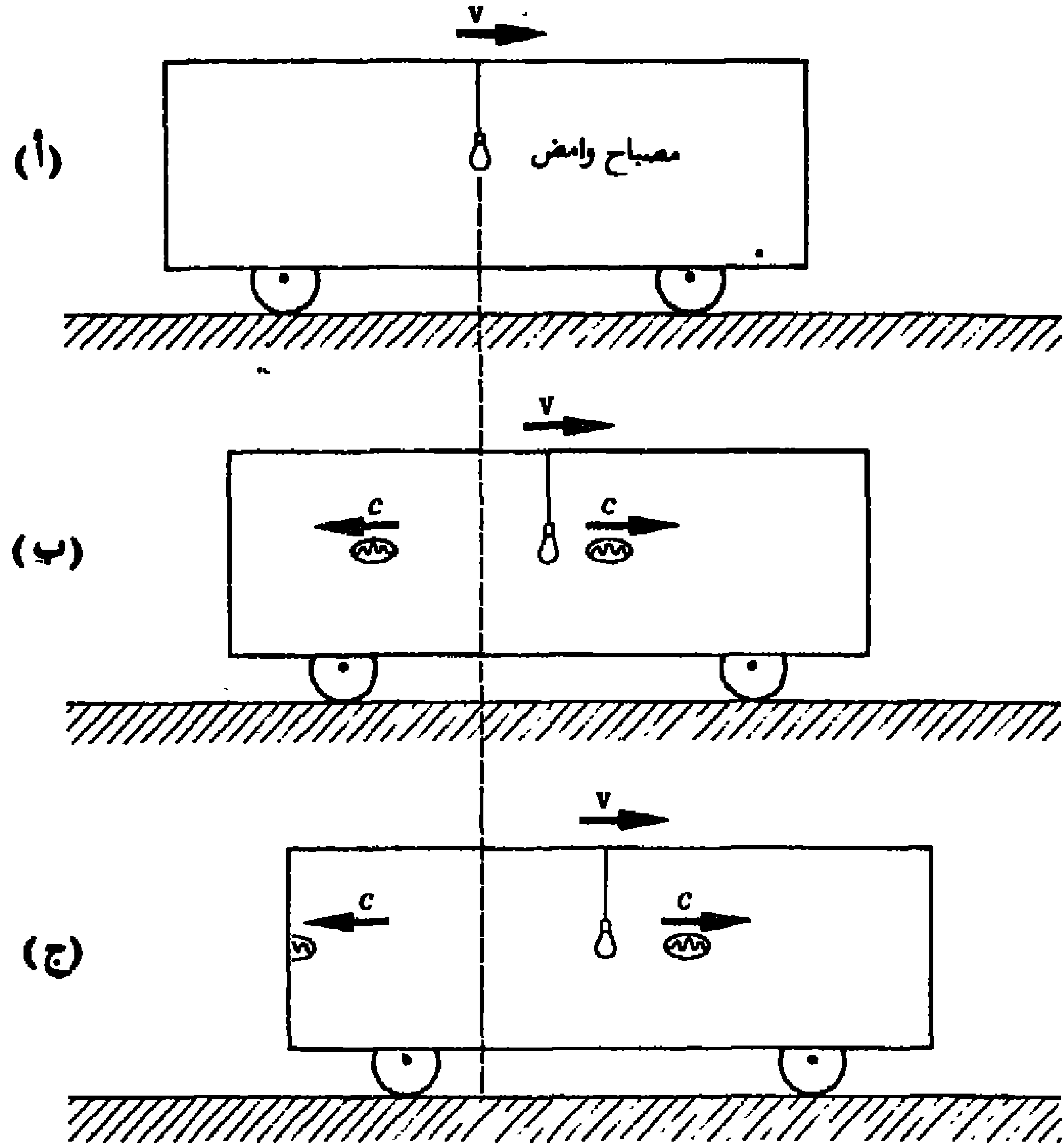
لايمكن لأى شىء يحمل طاقة أن يعجل لسرعة الضوء c

وسنرى كلما تقدمنا أن هذه النتيجة لنظرية أينشتين قد اختبرت بعناية أكثر من مرة وأنها وجدت صحيحة فى كل اختبار .

٢٦ — ٦ التزامن

سنرى فى هذا القسم أن الفروض الأساسية للنسبية تجبرنا على استنتاج أن الأحداث التى قد تقع فى زمن واحد فى أحد مناطات الإسناد القصورية قد لا تحدث فى زمن واحد فى مناط آخر . ولبيان ذلك سنلجأ إلى تدبير تجربة ذهنية سيكون أساس تجربتنا هو تقدم نبضة ضوء كما يسجلها ملاحظان قصوريان .

افترض أن عربة صندوقية تنتقل إلى اليمين بسرعة ثابتة وكبيرة جدا فى الشكل ٢٦ — ٧ أ . هناك مصباح وامض سريع مثبت فى منتصف العربة تماما وله عاكسان بحيث يرسل بالضوء يمينا ويساراً عند اشتعاله . وقد زودت العربة بخلايا كهرضوئية عند كل طرف حتى يمكن لرجل بداخل العربة أن يكتشف متى تصل نبضة الضوء إلى كل من نهايتى . العربة هناك أيضا امرأة ساكنة على الأرض تقوم باستخدام نبيطة عبقرية لكى تقيس تقدم نبضتى الضوء . لاحظ أن كلا الملاحظين موجود فى مناط إسناد قصورى (أحدهما عربة صندوقية متحركة والآخر الأرض) . ولذا فعليهما أن يريا نبضات الضوء تسلك « بشكل طبيعى » أثناء وجود كل منهما فى مناط الإسناد الخاص به . من الطبيعى أن المرأة التى على الارض سيكون طبيعيا بالنسبة لها أن تنتقل نبضات الضوء بسرعة c إلى اليمين وإلى اليسار من المصباح الوامض ، أما الرجل الموجود بالعربة « فالطبيعى » بالنسبة له أن تصل نبضتا الضوء إلى المكشافين عند طرفى العربة فى وقت واحد .



شكل (٢٦ – ٧)
على عكس الملاحظ القصورى فى المناط المتحرك . فإن الملاحظ الساكن على الأرض لا يرى نبضات الضوء وهى تصطدم بنهايتى العربة فى وقت واحد .

لنعتبر أولا الرجل الذى بالعربة . التجربة بالنسبة له بسيطة للغاية فالمصباح ساكن بالنسبة له ومثبت فى منتصف العربة . حين يشتعل المصباح تنتقل نبضتان مسافتين متساويتين إلى طرفى العربة فى زمنين متساويين(تذكر أنه بالنسبة للرجل ستكون التجربة هى نفسها سواء تحركت العربة أم لا لأنه لا يستطيع معرفة ذلك) . ومن ثم تصل نبضتا الضوء إلى طرفى العربة فى زمن واحد .

ولنعتبر الآن كيف ترى المرأة التى على الأرض هذه التجربة . توضح قياساتها أن التجربة تسير بشكل طبيعى (بالنسبة لها) وأن الموقف يتطور كما فى الجزئين (ب) و (حـ) من الشكل ٢٦ – ٧ . لاحظ أن النبضات تقطع مسافات متساوية فى أزمنة متساوية إلى اليمين وإلى اليسار . ولكن حيث أن العربة تتحرك إلى اليمين فإن المسافة إلى الطرف الأيسر للعربة تصير أقصر . وينتج عن ذلك أن الملاحظة الساكنة على الأرض ستسجل أن النبضة التى إلى اليسار ستصل إلى طرف العربة قبل أن تصل النبضة الأخرى إلى الطرف المقابل وعلى هذا لن تصل نبضتا الضوء إلى طرفى العربة فى زمن واحد .

علينا اذن أن تستنتج أن الزمن ليس بالكمية البسيطة لأن :
الأحداث التى تقع فى زمن واحد فى أحد مناطات الإسناد القصورية قد لا تحدث فى زمن واحد فى مناط آخر

وتبين اعتبارات أبعد من هذه أن هذا الموقف يوجد فقط عندما تحدث عمليتان عند موقعين مختلفين . ففى الحالة الراهنة تحدث إحدى العمليات عند طرف العربة الأول بينما تحدث الأخرى عند الطرف المقابل .

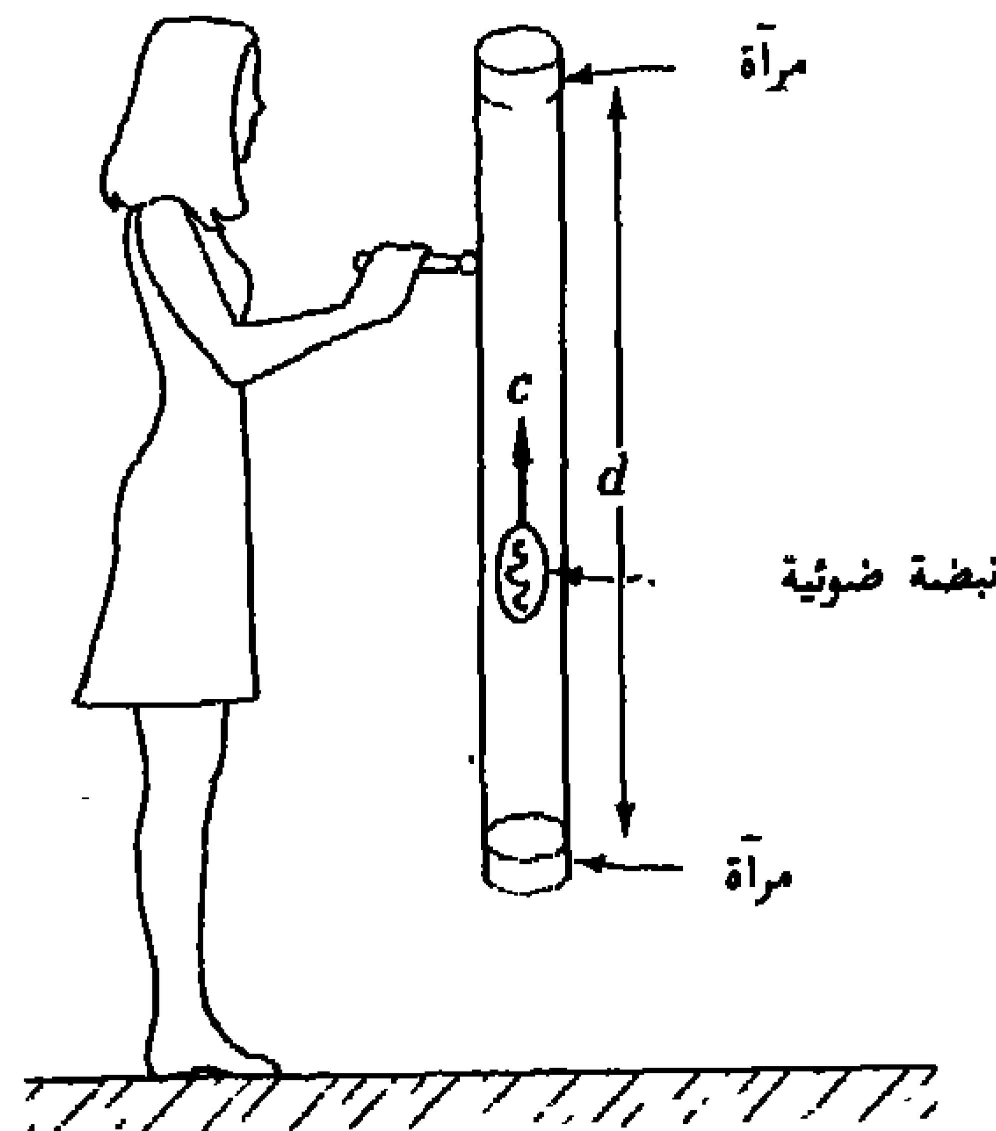
٢٦ - ٧ الساعات المتحركة تكون أبطأ فى حركتها

ربما تكون قد ارتبت من نتائج القسم السابق أن الضوء ليس بالكمية البسيطة وقد أشار أينشتين إلى هذا حين أوضح أن الساعة تدق بطريقة مختلفة للشخص الذى يحملها ولشخص يمر بجوارها ، وسنصور هذه الظاهرة بتجربة ذهنية باستخدام ساعة خاصة جدا على الرغم من أن أينشتين قد أثبت صحة هذه الظاهرة بشكل عام .

اعتبر الساعة وقد أمسكت بها المرأة التى فى الشكل ٢٦ - ٨ . تتكون هذه الساعة من نبضة ضوء تتحرك جيئة وذهابا بين مرآتين عاكستين مثبتتين فى أنبوبة تفريغ أسطوانية . كلما وصلت نبضة الضوء إلى المرآة السفلى فإنها تدق معلنة وحدة من وحدات الزمن والتى ستطلق عليها « طقة » ، فلو كان طول الأنبوبة 1.5 m لكان من السهل على المرأة أن تحسب الآتى :

$$\text{طقة واحدة} = \frac{2d}{c} = \frac{3.0\ \text{m}}{3.0 \times 10^8\ \text{m/s}} = 10^{-8}\ \text{s}$$

افترض الآن أن عدة نسخ قد صنعت من هذه الساعة وأن إحداها قد استعملها رجل فى سفينة فضاء . تنظر المرأة ومعها ساعة مشابهة من نافذة معملها (الكائن فى سفينة فضاء أخرى) فترى الرجل ينطلق بجوارها بسرعة v. ويسرها أن تجده يستعمل ساعة شبيهة بساعتها ، ويجرى بينها وبين الرجل اتصال لاسلكى فيخبرها أن الساعة تدور بشكل جيد وأنها تصدر طقة كالمعتاد كل $2d/c$ ثانية .



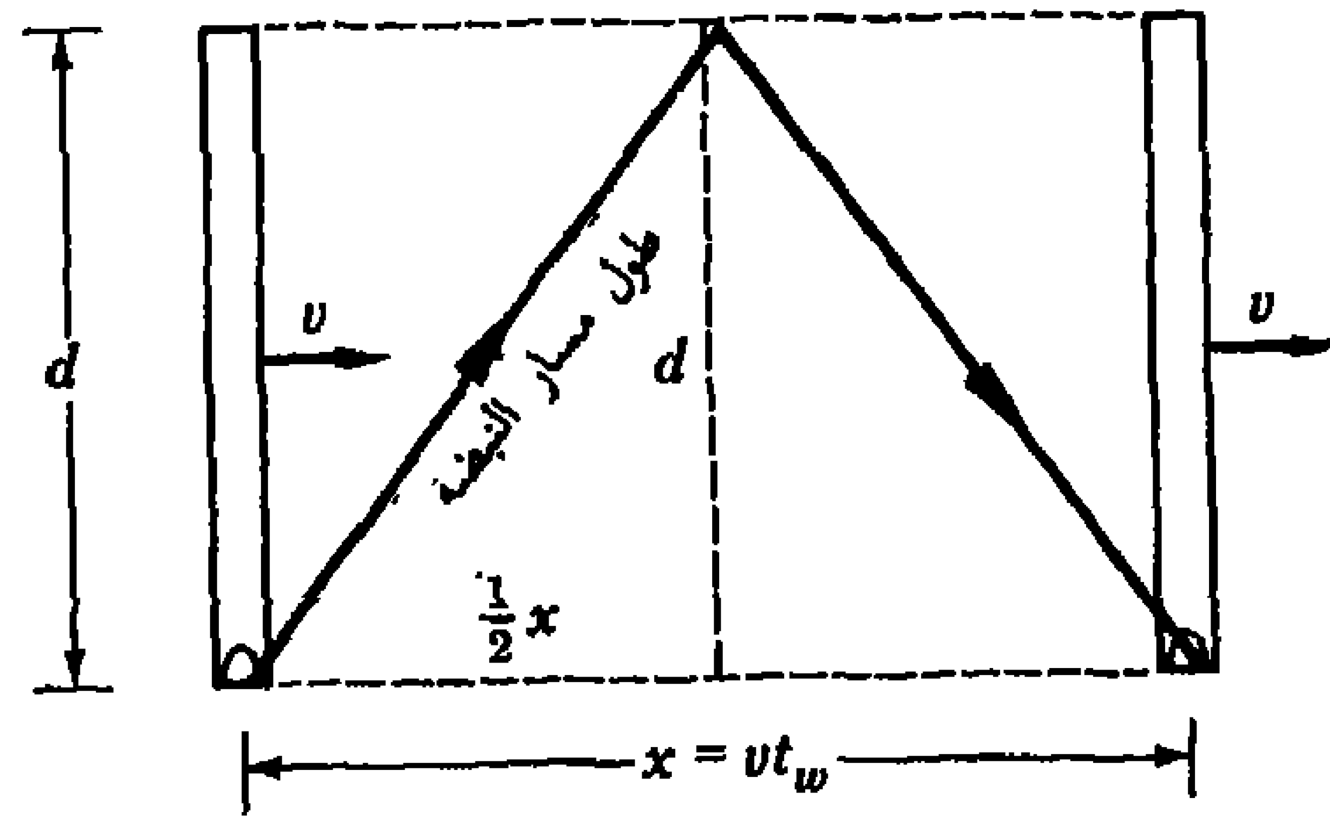
شكل (٢٦ - ٨)
تسجل الساعة الضوئية « طقة » واحدة كلما انعكست نبضة الضوء من المرآة السفلى .

وبعد أن فكرت المرأة برهة اكتشفت أن هناك شيئا غريبا فى الأمر ، واستنتجت أن ساعة الرجل لابد وأن تطقطق الزمن أبطأ من ساعتها ، ويمكن فهم تحليلها على النحو التالى :

بما أن ساعة الرجل تعمل بشكل مضبوط بالنسبة له ، فهى تعلم أنها ستدور بالطريقة المبينة فى الشكل ٢٦ - ٩ حيث نرى موقع الساعة عند طقتين متتاليتين . لاحظ أن المرأة تعلم أن نبضة الضوء تتحرك على المسار المبين . وعلى الرغم من أن الرجل يرى النبضة وهى تتحرك فى خط مستقيم واحد إلى أعلى وإلى أسفل إلا أن المرأة تعلم أن النبضة تتحرك إلى اليمين أيضا بسبب حركة الساعة إلى اليمين* . وتقوم المرأة بحساب الزمن بين طقتين على ساعة الرجل كما يلى .

تتحرك النبضة - حسب رأى المرأة - مسافة هو طول الخط الملون فى الشكل ومن نظرية فيثاغورس ومن أبعاد الشكل نرى أن

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2 + (\tfrac{1}{2}x)^2}$$



شكل (٢٦ - ٩)
تنتقل نبضة الضوء فى الساعة المتحركة مسافة أكبر من $2d$ خلال فترة طقة واحدة ، ويكون طول مسار نبضة الضوء هو $2\sqrt{d^2 + (\frac{1}{2}vt_w)^2}$

(١)

ولكن المرأة تعلم أن ساعة الرجل تنتقل أمامها بسرعة v ، وأنه حسب ساعتها هى سيستغرق زمن t_w للانتقال من أحد الوضعين إلى الآخر وعلى ذلك فهى تعلم أن

$$x = vt_w$$

نتيجة لهذا - وحسب رأى المرأة - فإن ،

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2 + (\tfrac{1}{2}vt_w)^2}$$

---

* قد تتساءل : من منهما على حق ؟ كلاهما ، كما سنرى حالا . كل منهما يصف الموقف بشكل صحيح كما هو مقاس فى إطار الإسناد الخاص به

تعرف المرأة أيضا أن نبضة الضوء تنتقل دائما فى الفراغ بسرعة c وبناء عليه يكون الزمن اللازم لتغير الوضع المبين فى الشكل هو ،

$$t_w = \frac{\text{طول مسار النبضة}}{c} = \frac{2\sqrt{d^2 + (\frac{1}{2}vt_w)^2}}{c}$$

يمكننا أن نحل المعادلة سعيا وراء t_w ونجد (بعد تربيع الطرفين وترتيب الحدود ثم أخذ الجذر التربيعى

$$t_w = \frac{2d/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

ولكننا ندرك أن $2d/c$ هى الزمن الذى يصر الرجل على أن تستغرقه ساعته لتصدر طقة واحدة ، ومن ثم تكون لدينا النتيجة التالية :

$$\left(\text{الفترة الزمنية على الساعة المتحركة}\right) = \left(\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right)\left(\text{الفترة الزمنية على الساعة الساكنة}\right)$$

افترض مثلا أن الرجل يتحرك بسرعة مقدارها c 0.75 أمام المرأة ، فتكون قيمة المقدار $\sqrt{1-(v/c)^2}$ هى 0.66 ومقلوبها 1.51 ، وتحت هذه الظروف ستصدر ساعة المرأة 1.51 طقة خلال الزمن الذى تعلم فيه أن ساعة الرجل تصدر طقه واحدة فقط . وكما نرى فان الساعة المتحركة تسجل الزمن أبطأ من الساعة الثابتة .

تسجل الساعة المتحركة بسرعة v زمنا قدره $\sqrt{1-(v/c)^2}$ ثانية خلال زمن قدره 1 ثانية على ساعة ساكنة .

تتصل المرأة لاسلكيا بالرجل بعد أن وصلت إلى هذه النتيجة غير المتوقعة وتعلن له أنها قد اكتشفت أن الساعات المتحركة تطقطق أبطأ من الساعات الساكنة . وقبل أن تقص عليه التفاصيل أخبرها أنه كان يفكر فى نفس المشكلة وأنه اكتشف أن ساعتها ، و هى التى كانت تتحرك بالنسبة إليه بسرعة v كانت تطقطق أبطأ من ساعته . ثم تذكر الإثنان أن الحركة النسبية فقط هى التى لها معنى وأن كلتا الساعتين ليستا خاصتين .

تمدد الزمن

ستبدو أية ساعة متحركة بالنسبة لمشاهد على أنها تطقطق أبطأ اذا قورنت بساعة ساكنة بالنسبة للمشاهد .

تسمى هذه الظاهرة **تمدد الزمن** لأن الزمن يمتد كما نقول بالنسبة للساعة المتحركة . تنطبق هذه النتيجة المذهلة على أية آلية توقيت أيا كان تعقيدها ، فلو كان

الرجل يستخدم معدل نمو الطحالب على أنه أداة التوقيت لوجدت المرأة أن معدل نمو الطحالب يبطىء عند حركتها . وحتى تقادم جسم الانسان سيبطىء عند الحركة بسرعات عالية كما سنرى فى أحد الأمثلة التوضيحية التالية .

على أن هناك نقطة واحدة يجب علينا تذكرها وهى أن الساعة الجيدة ستبدو دائما طبيعية للشخص الساكن بالنسبة للساعة ، أما بالنسبة للأشخاص المتحركين بسرعة أمام الساعة فسيدعون أن الساعة تطقطق الوقت أبطأ . وعلى الرغم من هذا ستظل الساعة تعلن الوقت بشكل صحيح عندما ينظر إليها مشاهد ساكن بالنسبة إليها .

مثال توضيحى ٢٦ — ٢ . يعتبر قياس المدة التى تحياها الجسيمات غير المستقرة أحد الأمثلة المذهلة على تمدد الزمن . فالجسم المسمى بيون مثلا يحيا فى المتوسط حوالى 1.8×10^{-8} s فقط حين يكون ساكنا فى المعمل وحينئذ يتغير إلى صورة أخرى . ما هى المدة التى يحياها مثل هذا الجسيم إذا أطلق من المعمل بسرعة تبلغ $0.95c$ ؟

طريقة الحل يتحرك البيون فى الحالة الثانية بسرعة مقدارها $0.95c$ بالنسبة للمشاهدين فى المعمل ولابد أن التجارب توضح أن الساعة الداخلية للبيون ، وهى التى تحكم طول حياته ، يجب أن تبطىء بسبب الحركة . ويكون الزمن 1.8×10^{-8} s الذى تسجلة الساعة المتحركة حين يسجل بساعة المعمل هو كما يلى .

$$\text{الحياة حسب ساعة العمل} = \frac{1.8 \times 10^{-8}\ \text{s}}{\sqrt{1-(0.95)^2}}$$

وهذا المقدار يساوى 5.76×10^{-8} s . وكما نرى فإن البيون المتحرك سيحيا فترة أطول ثلاث مرات من البيون الساكن وقد أجريت هذه التجربة وتجارب أخرى متنوعة واتفقت نتائج التجربة مع النتائج المحسوبة .

مثال توضيحى ٢٦ — ٣ إن أقرب نجم إلى مجموعتنا الشمسية هو الفا قنطورس ويبعد مسافة 4.3×10^{16} m . وحيث أن الضوء ينتقل بسرعة 3×10^{8} m/s ، لذا فنبضة الضوء تستغرق 1.43×10^{8} s أو 4.5yr لكى تصل من الأرض الى النجم (ولذا يقال أن المسافة بين الأرض والنجم هى 4.5 سنة ضوئية) . ما هو الوقت الذى تستغرقه سفينة فضاء فى رحلة الذهاب والإياب حسب الساعات الأرضية إذا كانت سرعتها $0.9990c$ ؟ وكم تستغرق حسب الساعة المثبتة على سفينة الفضاء ؟

طريقة الحل : يمكننا بتقريب جيد اعتبار سرعة السفينة هى c ، وعلية تستغرق رحلة الذهاب والاياب 9 سنوات حسب الساعات الأرضية .

أما ساعات سفينة الفضاء فستدور أبطأ بكثير بمعامل نسبى مقداره

$$\sqrt{1-(0.999)^2} \approx 0.045$$

ولهذا ستسجل ساعة السفينة السنوات التسع على أنها (9.0) (0.045) أو حوالى 0.4 yr ، أى أن الرحلة لن تستغرق سوى خمسة أشهر تقريبا فى نظر طاقم السفينة . وهى مدة محتملة جدا إذا قيست بالسنوات التسع التى يسجلها الناس على الأرض .

التناقض الظاهرى للتوائم

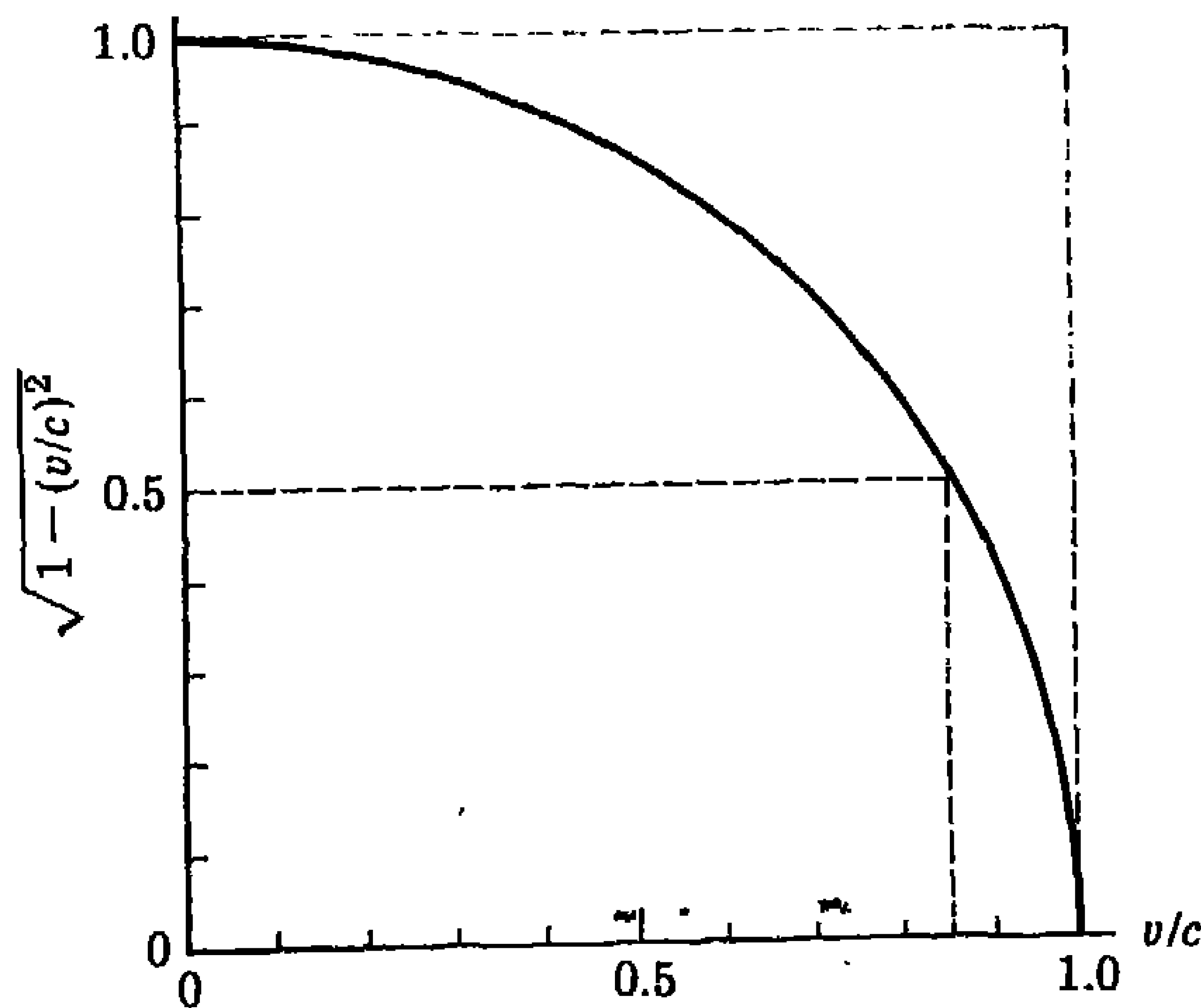
وقد يتصادف أن أحد توائم شخص من الطاقم قد ترك على الأرض وبذا صار عمره تسع سنين أثناء زمن الرحلة ، أما توأمه الذى كان على سفينة الفضاء فإن عمره سيكون خمسة أشهر فقط . وهذه الظاهرة المسماه **بالتناقض الظاهرى للتوائم** قد نوقشت طويلا بين العلماء وقد أجمعوا على أن هذه النتيجة صحيحة وأن التوأمين سيكون لهما عمران مختلفان .

مثال توضيحى ٢٦ – ٤ ارسم العلاقة البيانية بين المعامل النسبى $\sqrt{1-(v/c)^2}$ كدالة فى v. واشرح لماذا لا نلاحظ عادة التمدد النسبى للزمن .

طريقة الحل الرسم البيانى المطلوب موضح فى الشكل ٢٦ – ١٠ . يلاحظ أن المعامل النسبى يقل عن الواحد الصحيح عند السرعات الفائقة فقط بينما السرعات العادية وهى مادون $0.10c$، فإن التغيرات النسبية لا تكون محسوسة نظرا لصغر السرعات . وفى الحياة اليومية لا تقرب ساعاتنا مطلقا من السرعات الهائلة هذه .

٢٦ – ٨ الانكماش النسبى للطول

لاشك أن ظاهرة تمدد الزمن تؤدى إلى تأثير غريب على الأطوال المقاسة ولمعرفة هذا التأثير لنعتبر مرة أخرى الرجل والمرأة فى القسم السابق . لنقل أن المرأة ظلت على



شكل (٢٦ – ١٠)
يختلف المعامل النسبى كثيرا عن الواحد الصحيح فقط عند السرعات التى تقترب من سرعة الضوء .

الأرض بينما انطلق الرجل فى خط مستقيم متجها الى النجم ألفا قنطورس بسرعة v .ويخبرنا الفلكيون المستقرون على الأرض أن النجم يبعد عن الأرض مسافة قدرها $d = 4.3 \times 10^{16}$ m ولذا فالمرأة تعلم أن الزمن الذى يستغرقه الرجل لينتقل من الأرض إلى النجم هو d/v (حسب تقدير ساعتها هى) .

ولكن كم ستستغرق هذه الرحلة حسب ساعة الرجل ؟ تعلم المرأة أن ساعته سوف تسجل زمنا $\sqrt{1-(v/c)^2}$ من قيمة ما تسجله ساعتها. ولذا يكون الزمن الذى يسجلة الرجل لرحلته هو $(d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ بدلا من d/v وهذا ما سنعود إليه الآن .

علينا قبل هذا أن نشير إلى أن كلا من الرجل والمرأة متفقان على سرعاتهما النسبية . وهذا صحيح بالطبع حسب الفرض الثانى لأينشتين . أى أنهما متفقان على أن السرعة النسبية للحركة هى v . فالمرأة تقول بأن الرجل يتحرك بالنسبة للأرض وللنجم وكلاهما ساكن فى مناط الإسناد الخاص بها . أما مناط الإسناد الخاص بالرجل فهو ساكن عند موقع الرجل ، وهو نظام الأرض – النجم الذى يتحرك بالنسبة إليه بسرعة v ، ولنحاول الآن الربط بين هذه الحقيقة والنتيجة السابقة .

يعلم الرجل أنه يتحرك بالنسبة لنظام الأرض – النجم بسرعة v ، وكما رأينا ، تخبره ساعته أن وقتا قدره $(d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ يلزم لكى تمر به المسافة من الأرض إلى النجم . ومن هذه الحقائق يمكنه حساب المسافة من الأرض إلى النجم وهى ، المسافة من الأرض الى النجم بالنسبة للرجل = (الزمن) (السرعة)

$$d\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad = (v)\left[\frac{d}{v}\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\right] =$$

هذه هى المسافة بين الأرض والفاقنطورس كما حسبها الرجل ، أى أن الرجل يقطع مسافة أقصر من التى حسبتها المرأة ، وتقل هذه المسافة بالمعامل النسبى $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

وقد وجد أينشتين أن هذه النتيجة عامة ويمكننا تلخيصها فيما يلى :

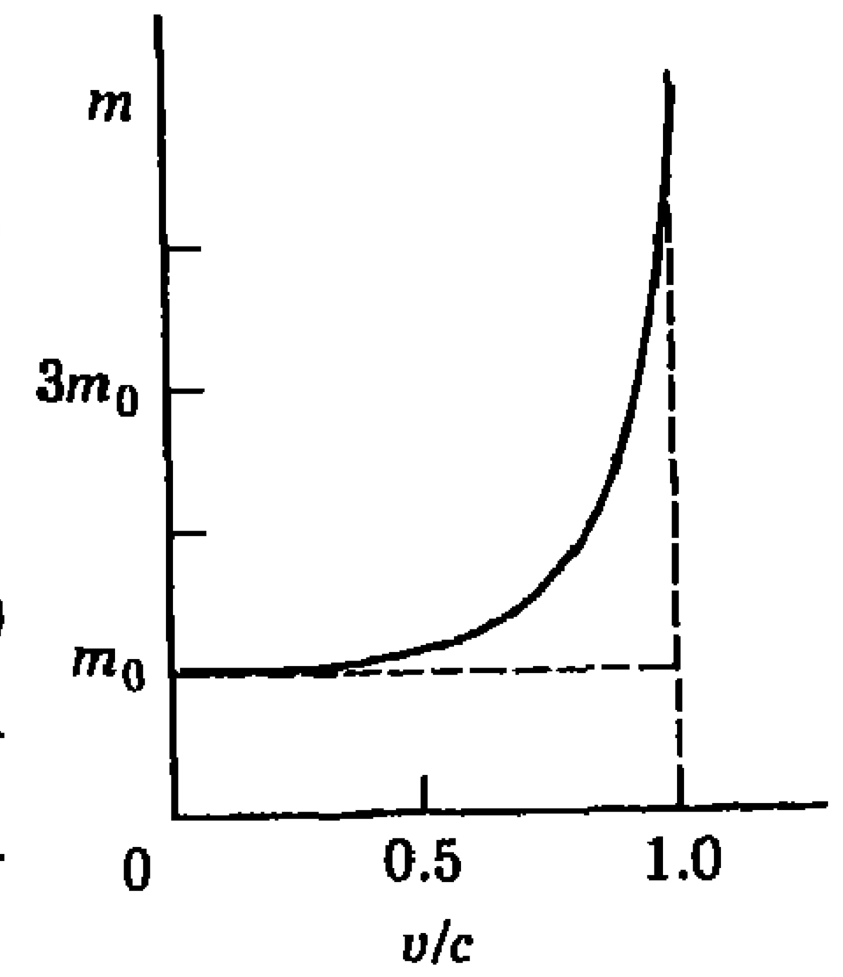
الأجسام المتحركة بسرعة v أمام مشاهد ما سيقيسها المشاهد فيجد أنها انكمشت على طول خط الحركة وهى تنكمش بالمعامل $\sqrt{1-(v/c)^2}$

لاحظ أن الانكماش حدث على طول خط الحركة فقط وأن مثل هذا الانكماش لم يلاحظ فى اتجاه عمودى على الحركة .

مثال توضيحى ٢٦ – ٥ يسافر رجل فى سفينة فضاء بسرعة كبيرة وهو ممسك فى يدة بعصا مترية . ما التغير الذى يلاحظ على طول العصا حين يغير وضعها من موازية لخط الحركة إلى وضع تكون فيه عمودية عليه ؟

طريقة الحل . لن يلاحظ أى تغيير على طول العصا ، فأثر انكماش الطول يظهر فى الأجسام التى تتحرك بسرعة فائقة بالنسبة للمشاهد بينما ظلت العصا ساكنة بالنسبة للرجل .

٢٦ – ٩ العلاقة النسبية بين الكتلة والطاقة



شكل (٢٦ – ١١)
تؤول m إلى ∞ عندما تؤول v/c إلى 1
الكتلة النسبية

لقد دلتنا فروض النسبية على أنه لا يوجد جسم يمكن تعجيله لسرعات تزيد على سرعة الضوء . ويمكننا على الفور أن نلاحظ تناقض هذا مع أفكار ما قبل النسبية . اعتبر ، مثلا ، جسما كتلته m عجل بواسطة قوة ثابتة F فتكون العجلة $a = F/m$ ونتيجة لهذا تكون سرعة الجسم النهائية بعد زمن قدره t هى ببساطة .

$$v = v_0 + at = v_0 + \frac{F}{m} t$$

وهذه العلاقة يجب أن تكون خاطئة ، لأنها تتنبأ بأن السرعة يمكن أن تزيد بلا حدود وطالما كانت القوة مؤثرة فإن السرعة ستأخذ فى الزيادة . وهذا يتناقض مع حقيقة أن سرعة الجسم لا يمكن أن تزيد عن c . إذن فلابد أن يكون هناك شىء ما ، خاطىء بشكل واضح فى أفكارنا اللانسبية للأجسام المتحركة بسرعات كبيرة جدا .

إن دراسة فروض النسبية تؤدى إلى معرفة مصدر هذه الصعوبة . إذ أن كتلة الجسم تتغير بتغير سرعته . فعند السكون تكون كتلة الجسم m_0 وهى **كتلة السكون** . أما عند السرعات العالية فتكون كتلة الجسم أكبر .
تكون الكتلة الظاهرية لجسم كتلة سكونه m_0 **هى** $m_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$ **حينما يتحرك بسرعة** v أمام المشاهد .

وقد وضحت هذه العلاقة لتغير الكتلة مع السرعة فى الشكل ٢٦ – ١١ .

لاحظ هنا أهمية معامل النسبية المألوف $\sqrt{1-(v/c)^2}$ يكون تغير الكتلة مع السرعة ضئيلا حتى تقترب السرعات من c وعندها تبدأ m فى الزيادة السريعة . أما عند $v = c$ فيصبح معامل النسبية صفرا و$m/m_0 \to \infty$ تصبح كتلة جسم ما لانهائية عند اقتراب سرعة الجسم من سرعة الضوء . والكتلة اللانهائية تلزمها قوة لا نهائية حتى تعجلها . ولما كانت القوى اللانهائية مستحيلة فمن الواضح أن الجسم لا يمكن تعجيله إلى سرعة الضوء . ونحن نعلم هذا بطبيعة الحال وان كنا نرى الآن سببا لتقييد السرعة .

تقوم القوة المؤثرة على الجسم لتعجيله بإمداد الجسم بالطاقة . ونحن نعلم أنه عند السرعات المنخفضة يكون الشغل المبذول بالقوة المؤثرة مساويا الزيادة فى طاقة حركة

الجسم بشرط إهمال التغيرات فى طاقة الوضع والشغل نتيجة الاحتكاك ، وهذا صحيح حتى لسرعات قريبة من c على أن طاقة حركة (ط ح) الجسم لم تعد هى $\frac{1}{2}m_0v^2$ وليست أيضا كما قد يظن $\frac{1}{2}mv^2$. لقد وجد بدلا من هذا أنها تعطى بالمعادلة .

طاقة الحركة النسبية

$$KE = (m - m_0)c^2 \qquad (٢٦ - ٤)$$

يتضح أن المعادلة (٢٦ - ٤) تختصر إلى ط.ح $= \frac{1}{2}m_0v^2$ عندما $v \ll c$. ولذا فإن التعبير الصحيح لطاقة الحركة ط.ح. هو المعطى بالمعادلة ٢٦ - ٤ ، أما المعادلة $\frac{1}{2}m_0v^2$ = ط.ح فيكون دقيقا جدا للسرعات المنخفضة بحيث يكون مؤكدا أن $m \approx m_0$ أما حين تكون $v \to c$ فإن المقدار $(m - m_0)c^2$ هو الذى يعبر عن ط.ح.

من الممكن إثبات أن علاقة شبيهة بالمعادلة (٢٦ - ٤) تنطبق على كل صور الطاقة ، وقد بين أينشتين أنه عند أى تغير فى طاقة جسم ما ، يكون هناك تغير مناظر فى كتلته . وتكون النتيجة هى أنه لتغير مقداره ΔE فى الطاقة ، تتغير كتلة الجسم بمقدار Δm يعطى بالمعادلة ،

العلاقة النسبية بين الكتلة والطاقة

$$\Delta E = \Delta m\, c^2 \qquad (٢٦ - ٥)$$

(وهذه كثيرا ما تكتب $E = mc^2$) . فإذا زدنا من ط.ح لجسم ما ، مثلا ، فإن كتلته تزيد تبعا لذلك حسب المعادلة ٢٦ - ٥ . وفى الواقع فإن هذه المعادلة تتنبأ بأن الكتلة لا يمكن أن تخلق عند تزويد الجسم بالطاقة (كما سنرى أمثلة على هذا فيما بعد) . أو بشكل أكثر بريقا أن الكتلة يمكن تدميرها لخلق الطاقة . وفى كلتا الحالتين يكون التغير Δm فى الكتلة مناظرا لتغير قيمته $\Delta m\, c^2$ فى الطاقة . وربما تكون على علم فعلا بأن الطاقة النووية لمفاعل ما أو لقنبلة نووية تنتج من حقيقة أن قدرا من الكتلة Δm قد دمر لإنتاج طاقة مقدارها $\Delta m\, c^2$.

مثال توضيحى ٢٦ - ٦ تبلغ قيمة الطاقة الكيميائية المتاحة فى تفاحة وزنها 100 g حوالى 100 k cal (لا يذكر علماء التغذية لفظ kilo ويسمونه cal مباشرة) . ولقد علمنا من دراسة الحرارة أن السعر calorie هو 4.184 J من الطاقة أى أن التفاحة تحتوى على 420J من الطاقة المتاحة . قارن هذه الكمية مع الطاقة التى يمكن الحصول عليها لو تحولت كل الكتلة إلى طاقة .

طريقة الحل . حسب معادلة الكتلة والطاقة فان

$$\text{الطاقة} = \Delta m\, c^2$$

وفى هذه الحالة $\Delta m = 0.10\ kg$ و $c = 3 \times 10^8\ m/s$ ولذا ،

الطاقة = $9 \times 10^{15}\ J$

من هنا نرى أنه عندما نأكل تفاحة فاننا نحصل على كسر ضئيل فقط من طاقتها . (10^{-13})

مثال توضيحى ٢٦ – ٧ ينشأ الضوء المشاهد على شاشة التلفزيون من الالكترونات التى تنطلق داخل الأنبوبة ثم تصدم الساتر الفلورى عند نهايتها ، وتصل سرعة هذه الالكترونات إلى ما يقرب من ثلث سرعة الضوء . ما هى الكتلة الظاهرية لالكترون له مثل هذه السرعة؟ ($m_0 = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$)

طريقة الحل تتحرك الالكترونات بسرعة تساوى $v = c/3$ بالنسبة لشخص يشاهد جهاز التلفزيون . ونتيجة لهذا ،

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{1}{3})^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{0.89}} = 1.06 m_0$$

ومنها

$$m = 9.6 \times 10^{-31}\ kg$$

أى أنه حتى عند هذه السرعة الهائلة لم تزد كتلة الالكترون إلا بمقدار 6 فى المائة .

٢٦ – ١٠ كمية تحرك الفوتون

لنعد الآن إلى مناقشة كم الضوء أو الفوتون . بما أن للفوتون طاقة فمن المتوقع أن تكون له كمية تحرك وكذلك كتلة . على أننا يمكن أن ندرك أن كتلة السكون للفوتون يجب أن تكون صفرا .

وحيث أنه ينتقل بسرعة مقدارها c فى الفراغ ، فإن

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 1}} = \frac{m_0}{0}$$

لو أن m_0 كانت لها أية قيمة إلا الصفر لأصبحت كتلة الفوتون لانهائية ، وحيث أن $E = mc^2$ ، فإن الكتلة اللانهائية ستعنى طاقة لا نهائية للفوتون ونحن نعلم أن هذا غير حقيقى . من هنا يجب أن نستنتج أن كتلة السكون للفوتون صفر .
لإيجاد كمية تحرك الفوتون سنفيد من علاقتى الطاقة للفوتون ،

طاقة الفوتون = $mc^2 = (m - m_0)c^2$ و طاقة الفوتون = $h\nu$

لو ساوينا هاتين المعادلتين لأمكننا أن نحل لإيجاد كمية تحرك الفوتون mc التى سنرمز لها بالرمز p وهى ،

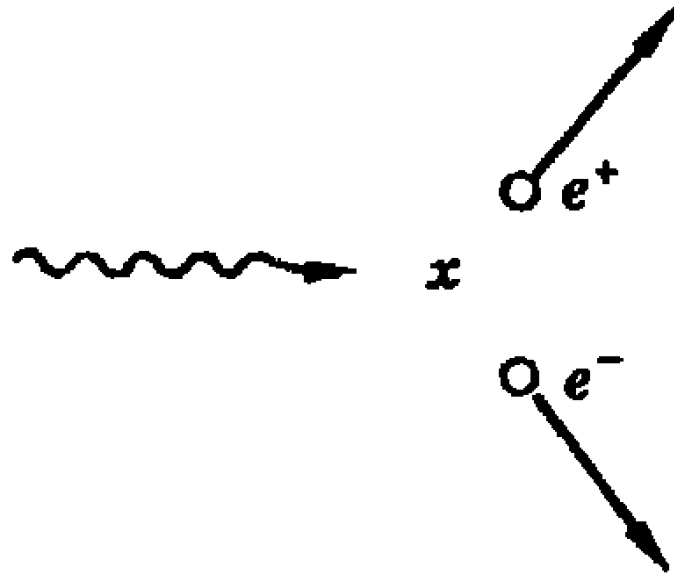
كمية تحرك الفوتون

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad ٢٦ - ٦$$

وقد استخدمت هذه القيمة بواسطة كومتون ودیبای فى نظريتيهما عن ظاهرة كومتون ،

وبهذا يكون لدينا طريقة لتخصيص طاقة وكمية تحرك لفوتونات الأمواج الكهرمغناطيسية وعلى الرغم من أن هذه الأمواج تبدو على أن لها طبيعة جسيمية فى ظروف معينة إلا أن الفوتونات تدين بكتلتها لطاقة حركتها . إذ لا كتلة سكون لها . وأية محاولة لإبطاء الفوتونات إما أن تكون غير ناجحة أو تجعلها تتخلص من طاقتها إلى صورة أخرى .

وهناك مثال صارخ على ما يحدث للفوتون حين يتفاعل بحيث يفقد هويتة وذلك فى ظاهرة الإنتاج الزوجى . يلاحظ أحيانا فى تجارب سيأتى وصفها فى الفصل الثامن والعشرين أن الفوتونات عالية الطاقة تختفى مع خلق الكترونين كما يصور ذلك الشكل ٢٦ - ١٢ .



شكل (٢٦ - ١٢)
يتحول الفوتون إلى بوزيترون والكترون عندما يصل إلى النقطة x ويسمى هذا إنتاج زوجى .

لقد وجد أن الفوتون الذى ينتقل خلال المادة ينحل عند النقطة x الى الكترون سالب وبوزيترون (الكترون موجب) مع ملاحظة أنه لا تخلق أية شحنة فى هذه العملية بمعنى أن الشحنة الكلية محفوظة . ومن الطبيعى أن تكون الطاقة وكمية التحرك محفوظتين ويمكن تحقيق هذا الشرط اذا حدث التحلل بقرب من نواة فقط . وعلى الرغم من أن الشحنة ، كمية التحرك ، والطاقة كلها محفوظة فى الإنتاج الزوجى ، إلا أن هناك كتلة سكون تخلق فعلا فى هذه العملية ، وذلك لأن الفوتون الأصلى كانت كتلة سكونه صفرا بينما للنواتج النهائية كتلة سكون تساوى ضعف كتلة الالكترون .

٢٦ - ١١ موجات الجسيمات

تتصرف الأمواج الكهرمغناطيسية تحت ظروف معينة كما لو كانت مكونة من جسيمات كما رأينا . وقد تبدو ثنائية الجسيم – الموجة غريبة نوعا ما ، ومع هذا لم تؤثر حالة معروفة ، بحيث يظهر تناقض معها . ففى أية تجربة يستطيع الإنسان دائما أن يقرر نوع السلوك الموجود . ويمكن تلخيص السلوك العام بعبارة هى أن السلوك الموجى يسود أثناء انتشار الإشعاع أما السلوك الجسيمى فيسود خلال التفاعل مع المادة .

وهناك تشابة إلى حد ما فى مواقف تحدث بين البشر .. فبغض النظر عن حسن معرفتنا بشخص ما إلا أننا لا نستطيع بداهة أن نقرر كيف ستكون أفعاله حين يواجه موقفا جديدا . وحين نندهش من تصرفه فإننا نبرر دهشتنا بالقول بأننا لم نعرفه جيدا كما كنا نظن . وبالمثل بالنسبة لأمواج الضوء : ففى عام ١٩٠٠ اعتقدنا أننا نعرفها جيدا ثم دهشنا حين وجدناها تتصرف بصورة غير متوقعة فى مواقف جديدة كما فى ظاهرة كومتون والتجارب الكهرضوئية .

بمجرد اكتشاف الطبيعة الجسيمية لأمواج الضوء برز سؤال عما إذا كانت الجسيمات قد تسلك أحيانا سلوك الموجات . وقد عولج هذا السؤال أولا على يد لوى دى برولى عام ١٩٢٣ (كان عمره وقتها ٣١ عاما ويشكل هذا العمل رسالته للدكتوراه) . وقد فكر فى أنه لما كانت كمية تحرك الفوتون تساوى h/λ فقد يكون ممكنا أن تكون كمية تحرك جسيم مادى ، الكترون مثلا ، مساوية لكمية كهذه . وفى هذه الحالة تكون λ هى الطول الموجى للالكترون . أو على الأقل خاصية موجية مرتبطة بالالكترون وبناء علية نكتب $mv = h/\lambda$ ومنها

طول دى برولى الموجى

$$\text{الطول الموجى المرتبط بالجسيم} = \frac{h}{mv} \qquad (٢٦ - ٧)$$

وهذا ما يسمى بطول دى برولى الموجى لجسيم ما

سنرى فى الفصل القادم أنه كانت لدية طريقة متاحة لاختبار صحة هذا الفرض . لقد افترض نيلز بوهر ، على وجه الخصوص ، نموذجا لذرة الايدروجين مفترضا فيه أن الالكترون يتصرف بطريقة محددة جدا . وقد ثبت أن هذا النموذج ناجح إلى أبعد حد فى تفسير خواص الذرات إلا أن بوهر لم يكن قادرا على تقديم أى تفسير لسلوك الالكترون بالطريقة التى افترض أنه يقوم بها . أما دى برولى فقد بين أنه لو كان للالكترون خواص موجية وطول موجى معطى بالمعادلة (٢٦ - ٧) فإن فرض بوهر يتضح فورا كنتيجة لهذه الخاصية الموجية . وسنعود إلى هذه المسألة مرة أخرى بعد أن نناقش ذرة بوهر فى الفصل القادم .

لقد حصل دافيسون وجرمر عام ١٩٢٧ على برهان مباشر للطبيعة الموجية للجسيمات المادية ، أثناء دراسة استطارة الالكترونات من البللورات المعدنية . فقد أطلقا شعاعاً من الالكترونات نحو بللورة معدنية (النيكل) ولاحظا عدد الالكترونات المستطارة عند زوايا مختلفة بعد اصطدام الشعاع بالمعدن . وقد وجدا أنه تحت ظروف معينة يستطار الشعاع الالكترونى بصورة انتقائية بحتة فتخرج الكترونات كثيرة عند زوايا معينة وتخرج كمية ضئيلة عند زوايا أخرى ولم يكن لديهما أى تفسير لهذه النتائج فى بادىء الأمر وقررا أنها غير قابلة للتفسير .

حينما اقترح على دافيسون وجرمر أن هذه النتائج قد تكون عبارة عن تأثيرات التداخل الموجى الناشىء من الطبيعة الموجية للالكترونات ، كما فرضها دى برولى ، قاما بعمل المزيد من القياسات لاختبار هذه النقطة . وسرعان ما أكد كثير من الباحثين أن الالكترونات تنعكس من البللورات بنفس الطريقة التى تنعكس بها أشعة X . وقد رأينا فى الفصل الخامس والعشرين كيف يمكن حساب الزوايا التى تنعكس عندها أشعة X بشدة من على بللورة إذا علم الطول الموجى لأشعة X وكذا البعد البينى فى النسق البللورى . وباستخدام معادلة دى برولى للطول الموجى المصاحب للالكترون يمكن التنبؤ بزوايا الانعكاس القوى للالكترونات وقد كان الاتفاق ممتازا مع النتائج العملية . ومن ثم يصبح لدينا برهان مباشر معقول على حقيقة أن الالكترونات تتصرف أحيانا كموجات وأن طبيعتها الموجية يمكن **التنبؤ بها** من المعادلة (٢٦ - ٧) .

مثال توضيحى ٢٦ - ٨ عجل الكترون خلال فرق للجهد مقدارة 182 V . كم يبلغ الطول الموجى المصاحب له ؟

طريقة الحل . توجد أولا سرعة الالكترون من المعادلة المألوفة .

$$Vq = \tfrac{1}{2}mv^2$$

(من المسموح به هنا استعمال طرق لا نسبية حيث أن v أقل بكثير من c) . بالتعويض فإننا نجد $v = 8\times 10^6$ m/s أما الطول الموجى المصاحب فهو ،

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}}{(9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})(8 \times 10^{6}\ \text{m/s})}$$
$$= 0.91 \times 10^{-10}\ \text{m} = 0.91\ \text{Å}$$

وهو يقارب مقدار الأطوال الموجية لاشعة X . ومن هنا يتضح سبب ظهور تأثيرات حيودية للالكترونات مثل أشعة X .

مثال توضيحى ٢٦ - ٩ تتدحرج كره بيسبول وزنها 50 g على منضدة بسرعة 20 m/s كم يبلغ الطول الموجى المصاحب لها ؟

طريقة الحل بتطبيق المعادلة (٢٦ - ٧) واستخدام واحدات SI نجد أن $\lambda = 6.6\times 10^{-32}$ m ولكى نجرى تجربة تداخل بهذه الكرة ، كان علينا أن نجعلها تمر من شقوق تفصل بينها مسافة كهذه . وحيث أن هذه المسافة أصغر بكثير جدا من الأبعاد الذرية فمن الواضح استحالة إجراء تجربة تداخل كهذه بالكرة .

وأية حسابات مشابهة لأى جسم له حجم مما يستعمل عادة فى المعامل ستكون مقنعة بأن الأطوال الموجية المصاحبة للجسم أقل بكثير جدا بحيث لا تسمح

باكتشاف الطبيعة الموجية للجسم . ولا تظهر هذه التأثيرات وتصبح ملموسة إلا حين تصغر الكتلة m جدا – كما للالكترونات والذرات – وتصير الأطوال الموجية أكبر بشكل معقول .

٢٦ – ١٢ مبدأ عدم اليقين

لقد أجريت التجارب العديدة منذ اكتشاف الطبيعة الموجية للالكترون بهدف معرفة ما إذا كانت جسيمات أخرى لها نفس السلوك . من المستحيل كما رأينا فى المثال التوضيحى ٢٦ – ٩ أن نبتكر تجربة نرصد فيها الطبيعة الموجية للأجسام الكبيرة . إن الجسيمات ذات الحجم الذرى يمكن بسهولة نسبية دراسة التأثيرات الموجية لها . ولم يؤثر أى استثناء لمعادلة الطول الموجى لدى برولى ، بل إنه أصبح من الشائع استعمال الالكترونات والنيوترونات فى تجارب للحيود صممت خصيصا لدراسة التركيب البللورى .

وتؤدى الطبيعة الموجية لجميع الجسيمات إلى مبدأ فلسفى عظيم . فقبل هذا الاكتشاف كثيرا ما تجادل الفلاسفة عما اذا كان مصير الكون محدداً تماما . **فهل نستطيع – من حيث المبدأ على الأقل – أن نحدد موضع وسرعة وطاقة كل الجسيمات فى الكون ثم نتنبأ بعد ذلك بمسار الأحداث فى المستقبل ؟ يبدو أن الطبيعة الموجية لكل الجسيمات ستتطلب منا أن نجيب بالنفى على هذا السؤال . وقد انطوى مبدأ عدم اليقين لهيزنبرج على هذه الحقيقة .** ولذا سنقوم الآن بفحصة .

لننظر الآن كيف يمكننا تعيين موضع وسرعة و ط.ح لجسم أو جسيم . لتعيين موضع الجسيم علينا إما أن نلمسه بجسيم آخر أو ننظر إليه فى ضوء شعاع ما . وليكن الشعاع الضوئى من الضعف بحيث لا تقوم كمية تحركه بإحداث أية اضطرابات للجسم الذى ننظر إليه ، أو ربما نختار أن نلمس الجسم بجسيم منفرد وصغير لأقصى حد . سنطلق على الفوتون أو الجسيم الذى يستخدم لدراسة الجسم اسم **الجسيم المجسى** .

ولكى نجعل الاضطراب الذى يحدثه الجسيم المجسى أقل ما يمكن سنستعمل أقل ما يمكن من الطاقة . على أن هناك حد أدنى للطاقة لأن الطول الموجى للجسيم المجسى يجب أن يكون أصغر من الجسيم المفحوص ، وإلا حدثت تأثيرات تداخل وحيود كما رأينا فى الفصل الخامس والعشرين ، وجعلت الموجات المصاحبة للجسيم المجسى تكون صورا غاية فى التشويش للجسم . وقد رأينا – على وجه الخصوص – فى الفصل الخامس والعشرين أن أدق التفاصيل التى نراها باستخدام الموجات (موجات الجسيم

أو الضوء) يجب أن تكون فى حجم الطول الموجى . ومن ثم ، فإن موضع الجسم الذى ننظر إليه قد يتحدد بصورة بها بعض الخطأ مقداره ،

$$\Delta x \approx \lambda$$

وعلاوة على ذلك فإن كمية تحرك الجسيم المجسى (سواء أكان فوتونا أو مادة) تعطى بالمعادلة $p = h/\lambda$. وعندما يلمس الجسم المفحوص فإن بعض كمية التحرك هذه سوف يؤول إلى الجسم مما يجعل كمية تحرك هذا الجسم تضطرب بسبب هذا التغيير . ويكون هناك قدر من عدم اليقين فى كمية تحرك الجسم مقداره Δp ويعطى بالمعادلة ،

$$\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$$

فإذا ما ضربنا المعادلتين الخاصتين بـ Δx و Δp معا سنجد أن

$$\Delta p \times \Delta x \approx h$$

أو بطريقة أخرى ، عندما نستعمل أكثر التجارب التى يمكن تخيلها دقة لتعيين موضع جسم وقياسُ كمية تحركه فى نفس الوقت فإن حاصل ضرب الخطأ فى هذين القياسين سيكون مقاربا فى القيمة لثابت بلانك h . وهذه العلاقة تعتبر علاقة عامة تماما وهى صورة من صور مبدأ عدم اليقين لها يزنبرج .

يمكن الحصول على صورة أخرى لمبدأ عدم اليقين من خلال تحليل مماثل . فعندما يقترب الجسيم المجسى من الجسم المفحوص فان موضع الجسم سيكون غير مؤكد فى مسافة قدرها λ تقريبا كما رأينا منذ قليل . و λ هى بالطبع الطول الموجى المصاحب للجسيم المجسى . لو أن سرعة الجسيم المجسى كانت v فإن الزمن الذى يستغرقه الجسيم لكى ينتقل مسافة عدم اليقين هذه يكون λ/v. . ومن ثم يكون الزمن الصحيح – عندما يكون الجسم فى موضع معين – غير مؤكد بمقدار ،

$$\Delta t \approx \frac{\lambda}{v}$$

بالإضافة إلى هذا ستفقد طاقة الجسيم المجسى جزئيا إلى الجسم المفحوص عندما يصبح الإثنان متلامسين . ولذا يكون عدم اليقين فى طاقة الجسم مقاربا فى المقدار لطاقة الجسيم المجسى . وعليه ،

$$\Delta E \approx \frac{hv}{\lambda}$$

بضرب المعادلتين الأخيرتين فى بعضهما نجد أن

$$\Delta E \times \Delta t \approx h$$

وهذه هى الصورة البديلة لمبدأ عدم اليقين* .

مبدأ عدم اليقين

مبدأ عدم اليقين هايزنبرج : فى قياس متزا من للإحداثى x وكمية التحرك p لجسيم ما فإن ،

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad (٢٦ - ٨)$$

حيث Δx و Δp هما الخطأ فى قياس x و p . وبالمثل لو أن طاقة الجسيم E فى زمن قدره t قد قيسا معا فإن الخطأ ΔE و Δt يكونان بحيث أن :

$$\Delta E \, \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \quad (٢٦ - ٩)$$

من المستحيل ، إذن ، حتى من حيث المبدأ ، أن نعلم كل شيء عن جسم ما . فسيكون هناك دائما عدم يقين حول الطاقة الحقيقية فى زمن معين وحول كمية التحرك الحقيقية فى مكان معين . وهذه تعتبر واحدة من النتائج الأساسية المتأصلة فى مفاهيم كمات الضوء والموجات الجسيمية . من الواضح أن صياغة جديدة قد أصبحت لازمة لوصف الجسيمات الذرية وكمات الضوء فى المواقف التى تكون فيها هذه التأثيرات هامة . وقد ابتكرت طرق **ميكانيكا الكم والميكانيكا الموجية** لكى تتناول هذه الظواهر .

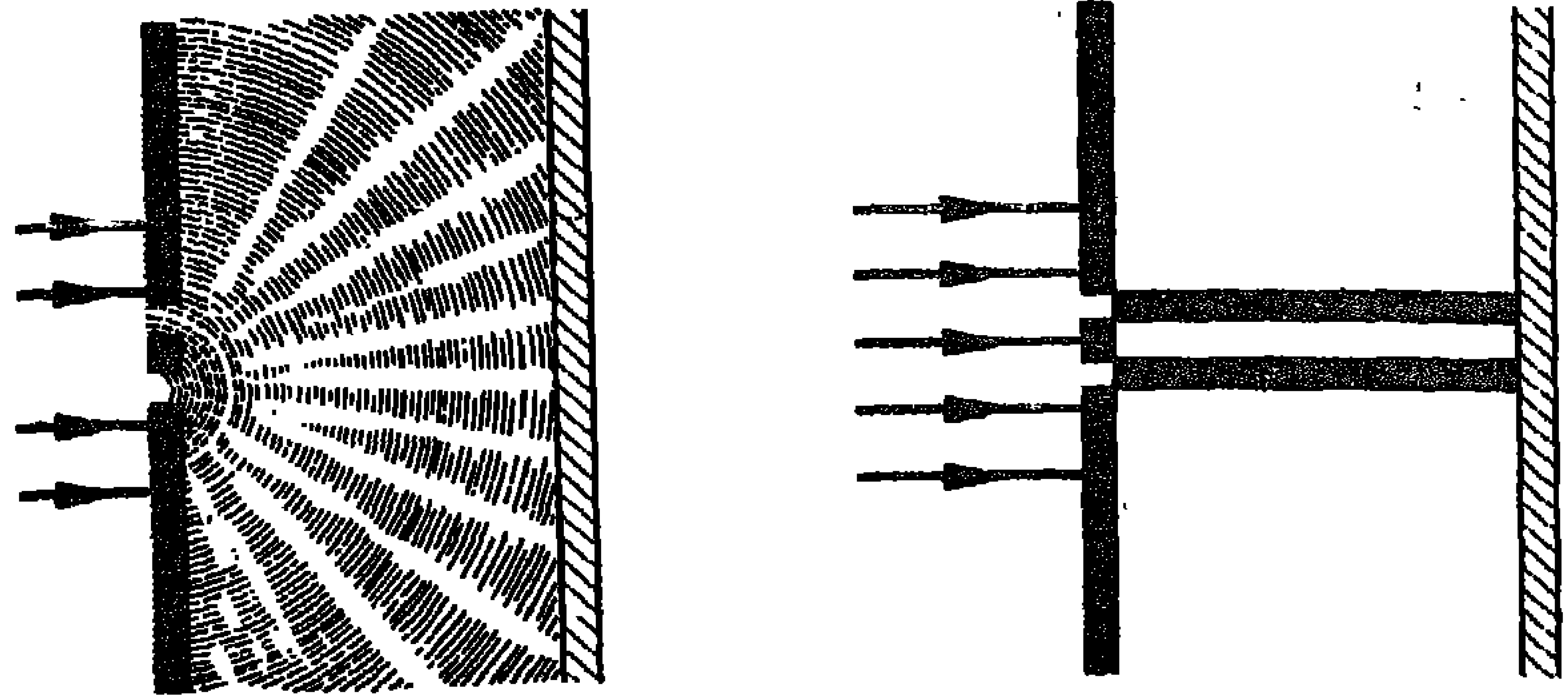
٢٦ - ١٣ ميكانيكا الكم

لنقم بفحص تجربة بسيطة حتى نرى بدقة أين تنطبق الطرق الكلاسيكية للميكانيكا وأين لا تنطبق . علينا لهذا الغرض أن نعتبر تجربة شق مزدوج معدلة كما فى الشكل ٢٦ - ١٣ . يسقط شعاع ضوئى منتظم على الشقين كما هو مبين ويصطدم الضوء بعد أن ينفذ خلالهما بالساتر الموجود خلفهما . وكما علمنا فى الفصل الخامس والعشرين لو أن عرض الشق وفاصل الشق d كانا أكبر بكثير من الطول الموجى للضوء فإن ظلالا واضحة ستسقط على الساتر ، وتظهر بقعتان مضيئتان هما فى الواقع صورتان حادتان للشقين على الساتر كما يوضح ذلك الشكل ٢٦ - ١٣ أ

---

* لقد بينت حسابات أكثر دقة أن h يجب أن يستبدل بها $h/2\pi$ فى كل حالة .

شكل (٢٦ - ١٣)
(أ) عندما يكون الطول الموجى المصاحب للجسيم أقل بكثير من عرض الشق ، تتكون صور واضحة للشق . (ب) ولكن عندما تكون λ بحيث تقارن بعرض الشق فإننا نلاحظ ظواهر التداخل النمطية .



(أ) (ب)

وبالمثل ، إذا سقط شعاع متواز من الالكترونات على الشقين فإنه يسلك كما فى الشكل ٢٦ - ١٣ أ بشرط أن يكون الطول الموجى المصاحب للالكترونات أقل بكثير من فاصل الشق ، وعلى ذلك فالموقف المبين فى الشكل ٢٦ - ١٣ أ هو مايمكن توقعة بالضبط من الميكانيكا الكلاسيكية للجسيم وفى هذه الحالة يتساوى شعاع من كرات البيسبول مع شعاع من الالكترونات وكلاهما ينفذ من الفتحات ويسقط على الساتر داخل منطقة جيدة التحديد . أى أن الميكانيكا الكلاسيكية النيوتونية تكون صحيحة عندما يكون الطول الموجى للجسيم أصغر بكثير من الأبعاد الهندسية المتضمنة فى التجربة .

أما إذا اعتبرنا سلوك الشعاع الضوئى عندما يكون فاصل الشق بحيث يمكن مقارنته بالطول الموجى للضوء ، فإننا نلاحظ نمطا عريضا للتداخل على الساتر . يوضح الشكل ٢٦ - ١٣ ب أن صور الشقين لم تعد تلاحظ . وبالمثل بالنسبة لشعاع الالكترونات : لو أن الطول الموجى المصاحب للجسيمات كان بحيث يقارن بفاصل الشق فإن الشعاع ينتشر ويسقط على الساتر مكونا نمطا للتداخل كما فى الجزء (ب) من الشكل ٢٦ - ١٣ ، وشدة نمط التداخل فى حالة موجات الضوء تشبة عدد الالكترونات الساقطة على الساتر فى حالة الجسيمات ، أى أنه لا جسيمات تسقط حيث تكون شدة الضوء - الذى له λ مماثلة - صفرا ، وأن الحد الأقصى من الجسيمات يسقط على الساتر حيث يجب أن تكون شدة الضوء فى نهايتها العظمى . وهذا الموقف مغاير تماما لما يمكن أن نتوقعه من الميكانيكا النيوتونية . ومن ثم لا تنطبق الميكانيكا الكلاسيكية فى هذا الموقف . أى تصبح الميكانيكا الكلاسيكية غير صحيحة عندما يصير الطول الموجى للجسيم معادلًا للأبعاد الهندسية المتضمنة فى التجربة .

صلاحية الميكانيكا الكلاسيكية

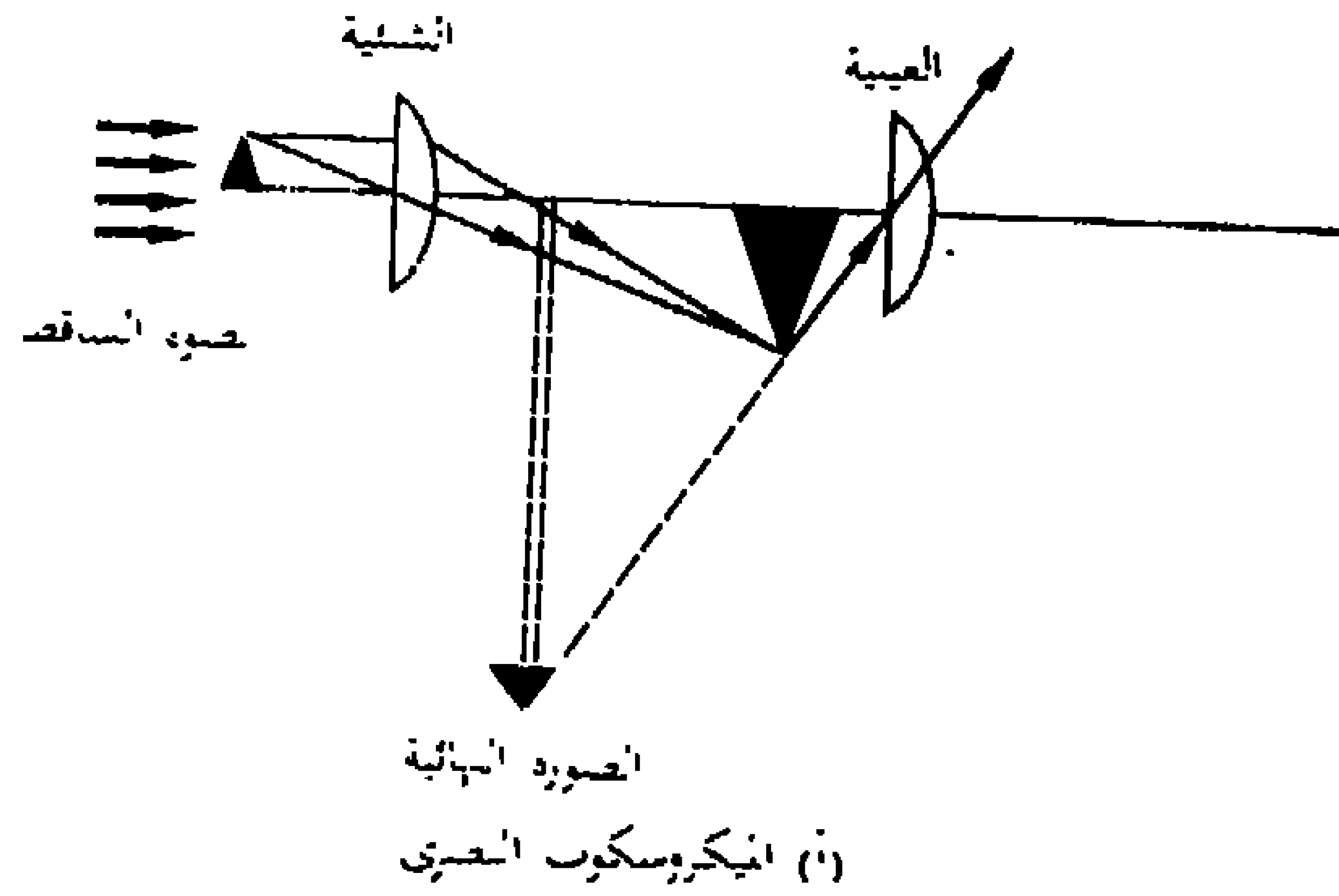
على أنه من الواضح أن سلوك الشعاع الضوئى يوصف دائما بشكل كاف بدلالة الظواهر الموجية — على الأقل فى هذه التجربة — . وحيث أن سلوك الجسيم يمكن وصفة بدلالة الموجات المصاحبة فى كلتا الحالتين بينما يقتصر دوز الميكانيكا النيوتونية على وصف الحالة المبينة فى الجزء (أ) فقط ، لذا يتضح أن وجهة النظر الموجية قابلة للتطبيق بشكل أعم .

بمجرد أن اقترح دى برولى الطبيعة الموجية للجسيمات ، **قام** اروين شرودينجر ، بوضع معادلة تصف سلوك الجسيمات بدلالة طبيعتها الموجية . **وأصبحت معادلة شرودينجر** أساس ميكانيكا الكم . وهذه المعادلة هى معادلة تفاضلية وتعتبر امتداداً لمعادلة مماثلة تستخدم لوصف سلوك الأمواج الكهرمغناطيسية . وقد أصبح من المعتقد الآن أنه بتعديل طفيف يمكن لمعادلة شرودينجر أن تتنبأ بالسلوك المشاهد للجسيمات تحت كل الظروف . وقد يكون علينا ، إذن ، أن نتخلى عن كل الميكانيكا التى تعلمناها فى هذا الكتاب . وأن نبدأ من جديد من هذه المعادلة الأساسية . على أن ذلك سيكون تهورا ، فمعادلة شرودينجر صعبة للغاية حين تستخدم فى الحصول على إجابات عملية إلا فى أبسط المسائل . ولهذا يختفظ الفيزيائيون بالمفاهيم الكلاسيكية والنيوتونية ويستخدمونها لحل معظم المسائل . ولا يهتمون بالتأثيرات النسبية الا حين تصبح سرعات الجسيمات قريبة من سرعة الضوء ، كما أنهم لا يهتمون بتأثيرات ميكانيكا الكم إلا حين تصبح الأبعاد الهندسية مقارنة بالطول الموجى للجسيم . وفى هذه الحالة ، وعلى الرغم من الصعوبات القائمة ، يجب استخدام ميكانيكا الكم للحصول على إجابات موثوق بها . وسنرى فى الفصل القادم أن السلوك الداخلى للذرات هو إحدى هذه الحالات .

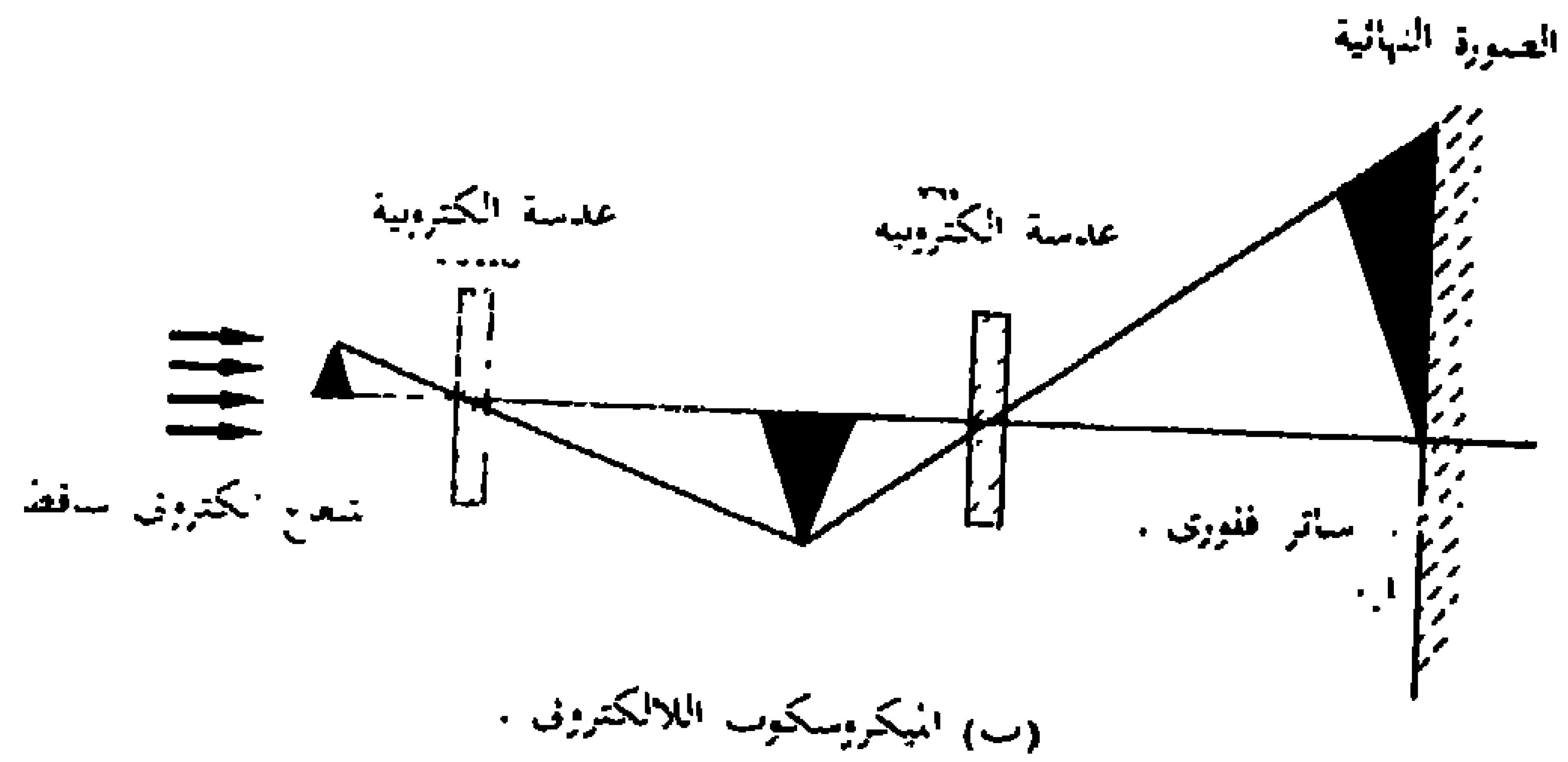
٢٦ – ١٤ الميكروسكوب الالكترونى

للالكترونات والجسيمات ذات الحجم الذرى – كما رأينا – طبيعة موجية . فشعاع الالكترونات العادى تكون الموجات المصاحبة له ذات طول موجى يقع فى مدى أشعة X القصيرة جدا كما حسبنا فى المثال التوضيحى ٢٦ – ٨ . ولو أمكن استخدام شعاع من الالكترونات بدلا من الضوء فى ميكروسكوب ما ، فان هذا الميكروسكوب سيتمكن من « رؤية » جسيمات غاية الصغر فى الحجم وذلك لأن الحجم الحدى يمكن مقارنته بالطول الموجى للموجات المستخدمة . وفى حين أن الميكروسكوبات العادية قادرة على رؤية تفاصيل أكبر من حوالى 100 nm ، فان الميكروسكوب الذى يستخدم شعاعا من الالكترونات يجب أن يكون قادرا على رؤية تفاصيل تبلغ من الصغر ما قيمته عدة عشرات من nm .

يكاد المبدأ الأساسى للميكروسكوب الالكترونى يتطابق مع ذلك الذى للميكروسكوب الضوئى . ولعلك تذكر أنه فى الميكروسكوب الضوئى تقوم العدسة الشيئية بتكوين صورة للجسم ثم يتم فحص هذه الصورة باستخدام عدسة عينية هى أساسا عدسة مكبرة . وقد روجع هذا الموقف فى الجزء (أ) من الشكل ٢٦ - ١٤ . وهناك موقف مشابه فى حالة الميكرسكوب الالكترونى كما هو موضح فى الشكل ٢٦ - ١٤ ب على أن العدسة الثانية تقوم بتركيز شعاع الالكترونات على ساتر فلورى حتى تتكون علية صورة واضحة (كما يحدث على شاشة التليفزيون) ؟ ثم يقوم الفنى بتصوير أو رصد هذه الصورة على الساتر . ومن الطبيعى أن يتم سير شعاع الالكترونات فى فراغ حتى لا تتصادم الالكترونات مع أى شيء . يوضح الشكل ٢٦ - ١٥ ميكروسكوبا نموذجيا وصورة فوتوغرافية التقطت منه . لاحظ أن الميكروسكوب الضوئى لن يكون قادرا على إظهار أية تفاصيل كالتى أعطيت هناك لأن الطول الموجى للضوء أكبر من الأجسام التى يراد رؤيتها .

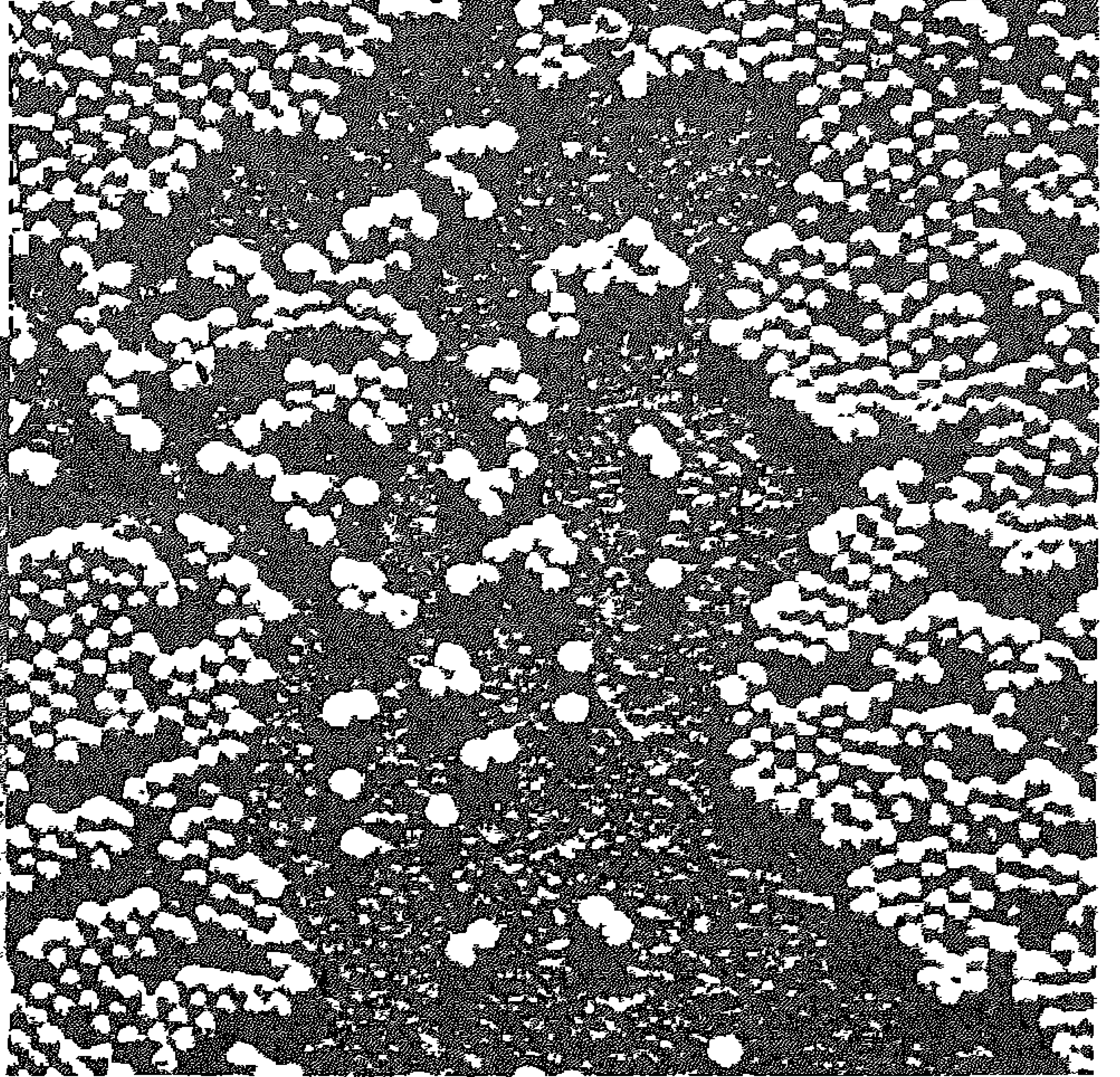


(أ) الميكروسكوب البصرى

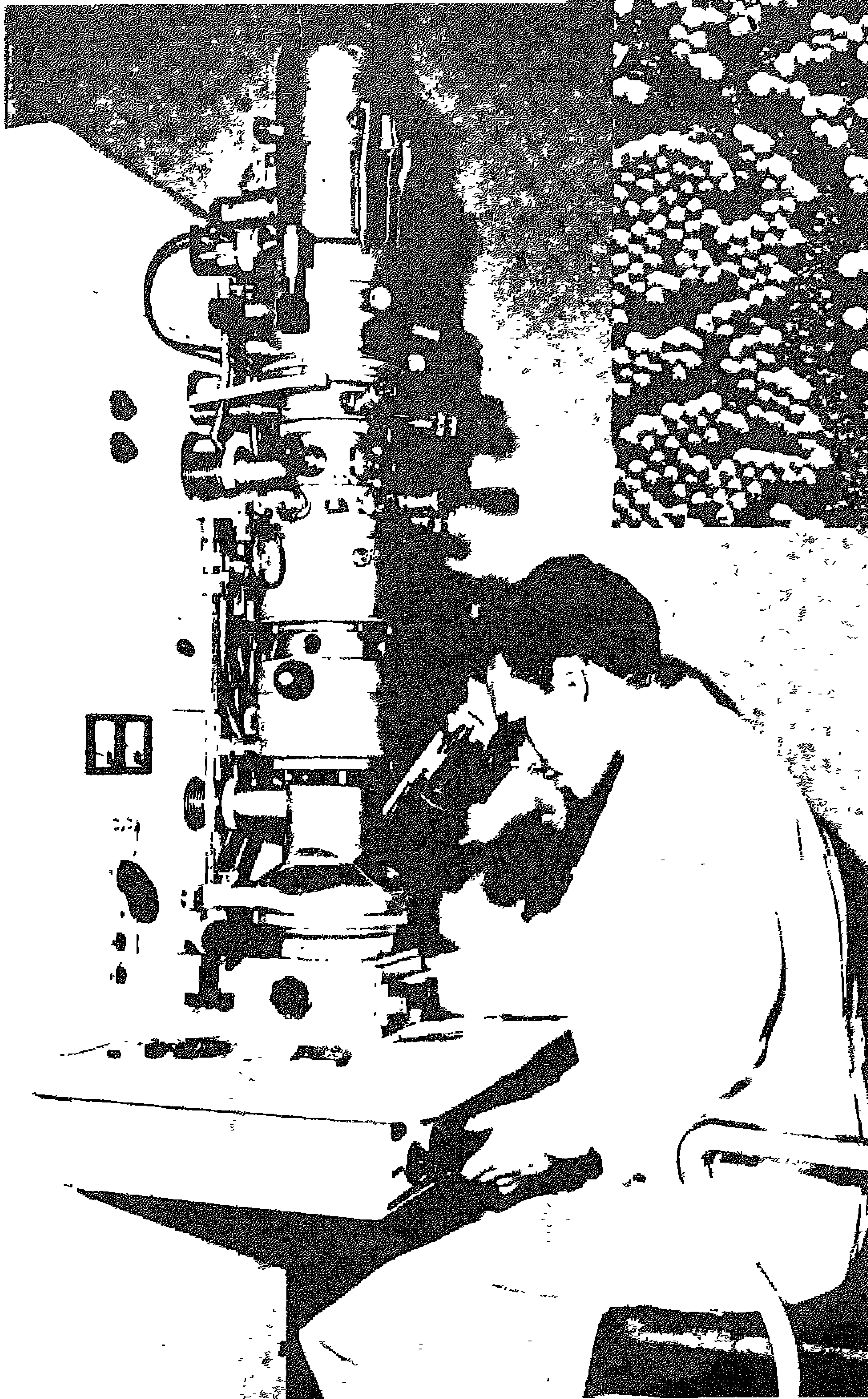


(ب) الميكروسكوب اللالكترونى .

شكل (٢٦ - ١٤)
تكون الصورة النهائية فى الميكروسكوب الالكترونى حقيقية ، بينما تكون فى العادة تقديرية فى حالة الميكروسكوب البصرى .



(أ)



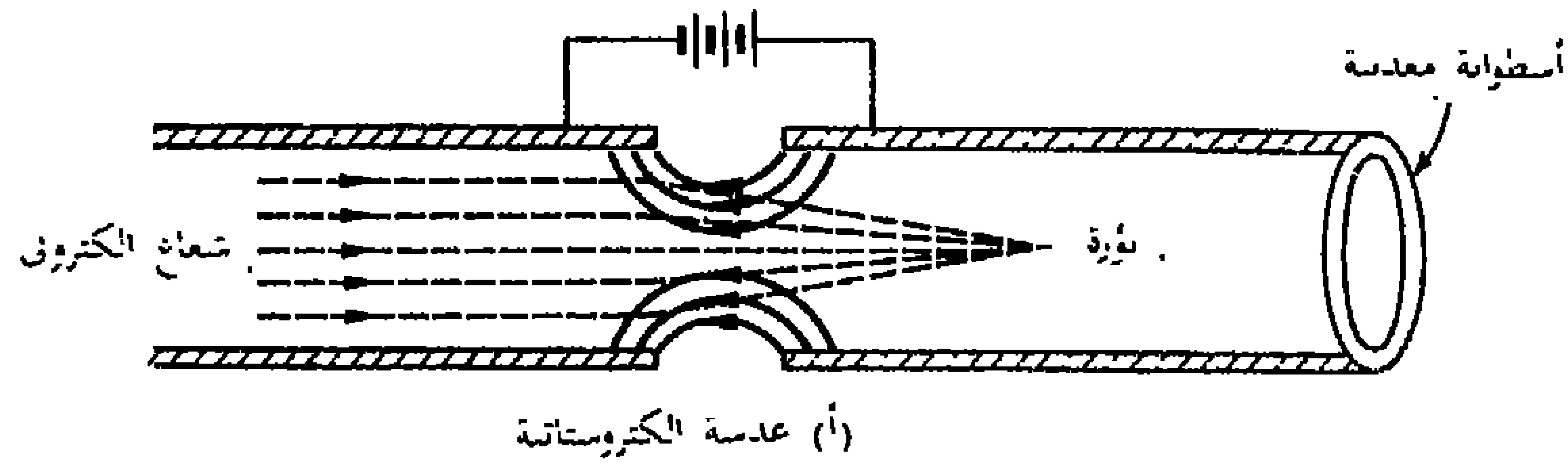
(ب)

تشكل (٢٦ - ١٥)

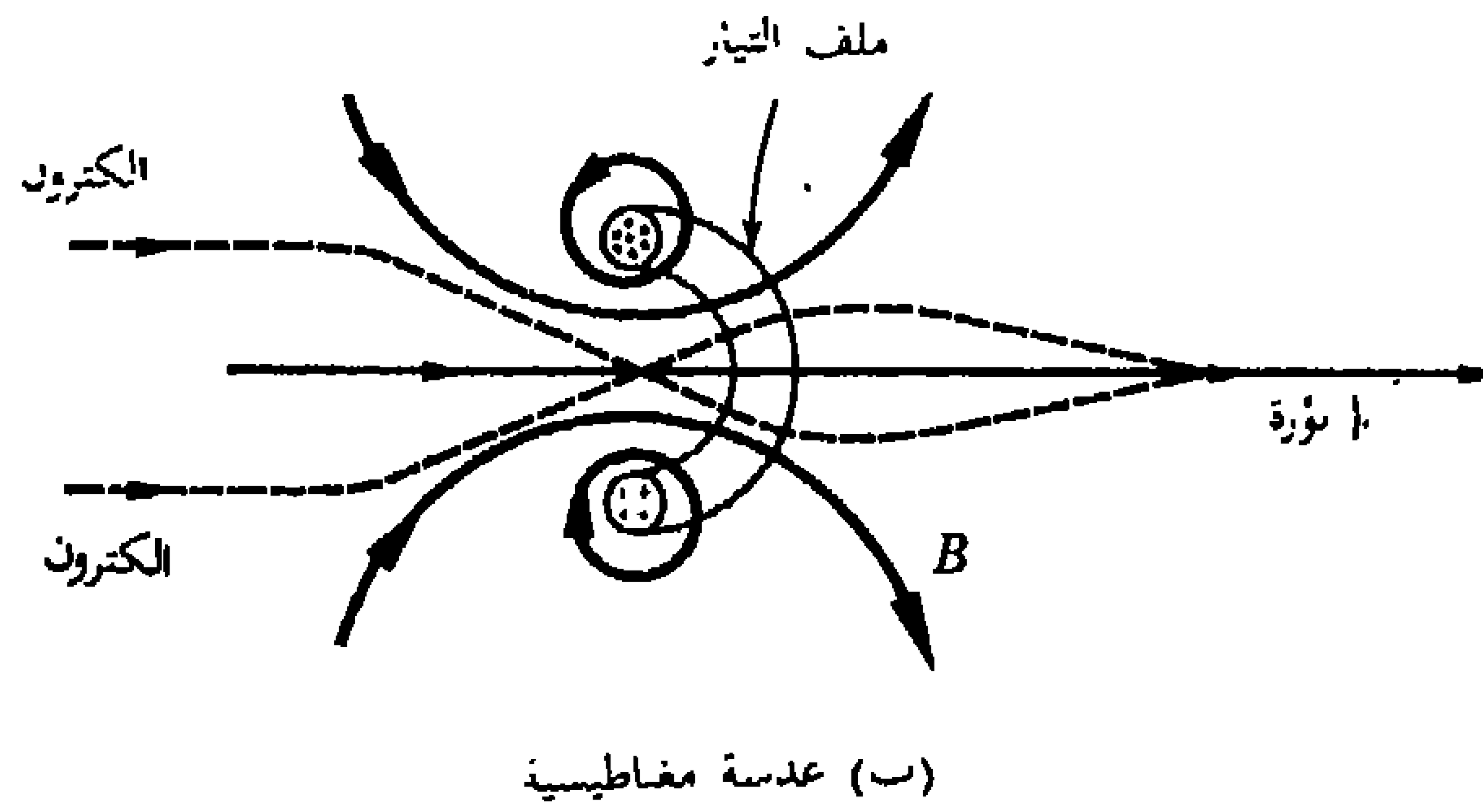
(أ) يعجل الشعاع الالكترونى فى هذا الميكرسكوب الالكترونى فى فرق للجهد مقداره 75.000 V ويمكنه التفريق فى حدود 10^{-7} cm . تحتوى الاسطوانات المتراصة فى الصورة الفوتوغرافية على عدسات مغناطيسية . أما مصدر الالكترونات فيوجد عند قمة الميكروسكوب . أما الصورة النهائية المكبرة فتظهر على ساتر فلورى عند قاع الميكروسكوب . ويمكن إدخال ألواح فوتوغرافية فى هذا المستوى للحصول على سجل فوتوغرافى يتم التركيز فى بؤرة بواسطة تغيير التيار فى العدسات المغناطيسية (أخذت الصورة من أ م فريمان مؤلف كتاب « الفيزياء » : مبادىء وتعمق . ماكجروهيل ١٩٦٨) .

(ب) يبلغ قطر كل من جزيئات فيروس البوليوميليتس المصور هنا حوالى 200°A (أخذت الصورة بواسطة ر.س. ويليامز . معمل الفيروسات . جامعة كاليفورنيا . بيركلى)

وقد تكون العدسات الالكترونية فى الشكل ٢٦ - ١٤ من نوعين ، الكتروستاتى ومغناطيسى . والعدسة أساسا هى نبيطة لتركيز الشعاع فى بؤرة ، وفى هذه الحالة شعاع من الالكترونات (وهى جسيمات مشحونة) . وهذان النوعان من العدسات موضحان فى الشكل ٢٦ - ١٦ . وعليك أن تفحص كل رسم منهما لتدرك كيف يتم التركيز فى بؤرة . ومن الصعب - للأسف - تصحيح هذه النبيطات ضد عيوب العدسات ولذا فإنه حتى الوقت الحاضر لم يتم تحقيق الحدود النظرية للتفريق فى الميكروسكوب الالكترونى عمليا ، فالتفاصيل الأقل من عدة انجسترومات لا يزال من الصعب رصدها على الرغم من أن الميكروسكوب الالكترونى يمكنه من الناحية النظرية أن يرصدها .



(أ) عدسة الكتروستاتية



(ب) عدسة مغناطيسية

شكل (٢٦ - ١٦)
يقوم المجال المغناطيسى *B* للملف فى العدسة المغناطيسية بجعل الالكترونات تسلك مساراً يلتف حول محور الملف فى حلزون نصف قطره متضائل .

ملخص

اكتشف بلانك أن مذبذبا تردده الطبيعي ν_0 يمكن أن يتخذ الطاقات $nh\nu_0$ فقط ، حيث n عدد صحيح . تكون هذه الطاقات متقاربة جدا من بعضها البعض فى حالة المذبذبات ذات الحجم الملموس ولذا تظهر كما لو كانت متصلة .

أثبت أينشتين أن شعاعا من الإشعاع ك.م. يكافىء فيضا من الفوتونات وطاقة كل فوتون هى hc/λ . فى التأثير الكهرضوئى يصطدم الفوتون بالكترون داخل الجسم الصلب ولو كانت طاقة الفوتون أكبر من طاقة دالة الشغل فإنه قد يطرد الكترونا من الجسم الصلب . فى ظاهرة كومتون يفقد الفوتون المستطار بعد الاصطدام مع الكترون حر تقريبا جزءا من طاقته ، وهذه الفوتونات المستطارة يكون لها λ أكبر من تلك التى للفوتونات الساقطة .

تقوم النسبية على حقيقتين واضحتين : أن سرعة الضوء فى الفراغ هى دائما c حسبما تفيد القياسات ، وأنه لا يمكن قياس إلا السرعات النسبية . أما الحقيقة الثانية فهى تكافىء القول بأن قوانين الطبيعة هى نفسها فى جميع مناطات الإسناد القصورية .

من بين النتائج الهامة التى يمكن الوصول إليها من هذه الحقائق ما يلى : ليس هناك جسم مادى يمكن تعجيله إلى سرعات تزيد على c ، وأن الأحداث المتزامنة فى أحد المناطات القصورية قد لا تكون كذلك فى مناط آخر ؟ وأن الساعة المتحركة تبدو أبطأ بمعامل قدره $\sqrt{1-(v/c)^2}$ ، تنكمش أبعاد الأجسام على طول خط الحركة بمعامل قدرة $\sqrt{1-(v/c)^2}$ ، تتغير كتلة جسم مع سرعته حسب العلاقة $m/m_0 = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ ، ترتبط الطاقة والكتلة بالعلاقة $E = mc^2$ ، تكون طاقة الحركة لجسم ما هى $(m - m_0)c^2$ وتختصر هذه الكمية إلى $\frac{1}{2}m_0v^2$ عند السرعات المنخفضة .

تبلغ كتلة السكون للفوتون صفرا أما كمية تحركة فتعطى بالمقدار h/λ طبق دى برولى هذه العلاقة على أجسام مادية فوجد أن جسما يتحرك بسرعة v سيكون له طول موجى $\lambda = h/mv$ مصاحب له . بالنسبة للجسيمات الذرية يكون الطول الموجى من الكبر بحيث يخلق بسهولة تأثيرات يمكن قياسها للتداخل والحيود .

تؤدى الطبيعة الموجية للجسيمات إلى ظهور القانون الطبيعى الذى لخصة مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج وهو يتمثل فى العلاقة

$$\Delta x\,\Delta p \geq h/2\pi \text{ and } \Delta E\,\Delta t \geq h/2\pi$$

تهتم ميكانيكا الكم بالطبيعة الموجية للمادة ولذا فهى قابلة للتطبيق حتى لو فشلت الميكانيكا الكلاسيكية النيوتونية . ولا تعود الميكانيكا الكلاسيكية صالحة عندما يصبح الطول الموجى للجسيم مقارنا بالأبعاد الهندسية المتضمنة فى التجربة .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية .

عند إتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ — أن تحسب الطاقات المسموح بها (حسب بلانك) لمذبذب معلوم تردده الطبيعى بشرط أن تعطى ثابت بلانك . وأن تفسر لماذا تبدو طاقة البندول على أنها متصلة .

٢ — أن ترسم العلاقة البيانية بين شدة الإشعاع مقابل λ لجسم ساخن وأن توضح كيف يتغير الرسم البيانى بتغير درجات الحرارة .

٣ — أن تصف التأثير الكهرضوئى وتبين ما المقصود بالمشرف الكهرضوئى وأن تذكر طاقة الفوتون بدلالة طوله الموجى . أن تشرح كيف ينطبق مفهوم الفوتون على التأثير الكهرضوئى . أن تحسب الطول الموجى المشرفى بمعرفة دالة الشغل .

٤ — أن تصف ظاهرة كومتون وأن تشرح كيف يمكن تفسيرها بدلالة استطارة الفوتونات .

٥ — أن تذكر فرضى النسبية الأساسيين . أن تشرح معنى مناط الإسناد القصورى وأن تعبر عن الفرض الثانى بدلالة قوانين الطبيعة حين تطبق فى مثل هذا المناط .

٦ — أن تذكر النتائج التى تؤدى إليها النسبية من حيث الآتى : السرعة القصوى للأجسام ، الأحداث المتزامنة ، تمدد الزمن ، انكماش الطول ، تغير الكتلة مع السرعة ، ط.ح ، التحول من الطاقة إلى الكتلة . أن تحسب إجابات المسائل البسيطة المتضمنة هذه النتائج .

٧ — أن تذكر ما هى كتلة السكون وكمية التحرك للفوتون .

٨ — أن تذكر الطول الموجى لجسيم حسب دى برولى إذا علمت كتلته والسرعة التى يتحرك بها . أن تشرح لماذا تسهل ملاحظة الخواص الموجية للالكترونات بينما لا يمكن ملاحظتها لكرات البيسبول .

٩ – أن تذكر الصور المختلفة لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرج بالكلمات ثم بالرموز .

١٠ – أن تشرح ماهى الظروف التى تستبدل تحتها ميكانيكا الكم بالميكانيكا النيوتونية الكلاسيكية . وانطلاقا من تحليل تأثيرات التداخل الملاحظة فى حالة الضوء، بين لماذا تنهار الميكانيكا النيوتونية تحت تلك الظروف .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

كم الضوء ، الفوتون

التأثير الكهرضوئى ، الطول الموجى المشرف

دالة الشغل

ظاهرة كومتون

فروض النسبية

مناط الإسناد ، المناط القصورى

تمدد الزمن

معامل النسبية

انكماش الطول (حسب النسبية)

كتلة السكون $m = m_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$

$\Delta E = \Delta mc^2$

كمية تحرك الفوتون $= h/\lambda$

الطول الموجى لدى برولى $= h/mv$

تجربة دافيسون وجرمر

مبدأ عدم اليقين

الميكروسكوب الالكترونى

أسئلة وتخمينات

١ – ناقش كيف يمكن أن يتأثر عالمنا إذا تغيرت الطبيعة فجأة بحيث صار ثابت بلانك أكبر 10^{32} مرة عما هو الآن ، مع اعتبار الموقف من زاويتين . (أ) تكمية طاقة المذبذبات ، (ب) مبدأ عدم اليقين .

٢ – كيف تقوم الصورة الفوتونية للضوء بتفسير الملامح التالية للتأثير الكهرضوئى ، (أ) الطول الموجى الحرج ، (ب) جهد الإيقاف يتناسب عكسيا مع الطول الموجى ؟

٣ – كيف يمكن قياس دالة الشغل لمعدن ما ؟ وكيف يمكن قياس ثابت بلانك ؟

٤ – ضع قائمة بالتجارب التى يسلك فيها الضوء كموجة وقائمة ، بالتجارب التى تكون طبيعته الكمية هى الهامة . هل هناك تجربة فى قائمتك يمكن تفسيرها من كلتى وجهتى النظر ؟

٥ – افترض أن ملاحا فضائيا كانت له المقدرة على معرفة أن شوكة رنانه معينة تعطى صوتا هو متوسط c عندما تطرق . ما الذى سيسمعه إذا أصغى للشوكة الرنانة عند طرقها داخل سفينة الفضاء التى يستقلها وهى تسير بسرعة $0.9c$ خلال الفضاء ؟

٦ – استخدمت شوكة رنانة مهتزة داخل سفينة فضاء لتسجيل الفترات الزمنية قبل مغادرة الأرض عن طريق طبع رقم معين على خريطة بيانية كلما مرت عند منتصفها . هناك نظام مماثل للشوكة الرنانة وله فترة مطابقة وهو يحفظ على الأرض بعد أن ينطلق صاروخ السفينة إلى الفضاء ثم يطير لبضع سنين بسرعة تقارب سرعة الضوء وأخيرا يعود للأرض . ما وجة المقارنة بين الخريطتين البيانيتين عندما تعود السفينة الى الأرض ؟

٧ – يعيش معظم البشر أقل من مائة سنة . وحيث أن السرعة القصوى التى يمكن اكتسابها بالنسبة للأرض هى c ، سرعة الضوء ، لذا فمن المستحيل على أى أنسان على الأرض أن يسافر فى الفضاء لأكثر من مائة سنة ضوئية قبل أن يصير عمره مائة سنة .

هل يعنى هذا بالضرورة أنه لن يستطيع أحد من البشر السفر لأ بعد من مائة سنة ضوئية من الأرض ؟ (السنة الضوئية هى المسافة التى يقطعها الضوء فى زمن قدره سنة واحدة أو 9.46×10^{15} m)

٨ – افترض أن سرعة الضوء لم تكن سوى 20 m/s وأن كل النتائج النسبية قد طبقت على أساس هذه القيمة لسرعة الضوء c . ناقش كيف كان يمكن لحياتنا أن تتغير .

٩ – تنتقل سفينة فضاء عبر الأرض بسرعة v_{earth} ثم تقوم بقذف قذيفة فى خط مستقيم أمامها وبسرعة مقدارها u_{ship} بالنسبة للسفينة كما يراها شخص بداخل السفينة . فى حالة السرعات العادية فإن سرعة القذيفة بالنسبة للأرض ستكون $v_{earth} + u_{ship}$. اثبت أن هذا غير صحيح لو كانت السرعات نسبية . (العلاقة الصحيحة عند السرعات الهائلة هى

$$\frac{v_{earth} + u_{ship}}{1 + v_{earth}u_{ship}/c^2}$$

يمكنك معرفة طريقة اشتقاق هذه المعادلة بالرجوع إلى كتب أكثر تقدما) .

١٠ – يجب أن يكون واضحا من دراسة هذا الفصل أن النص « المادة لا يمكن أن تستحدث أو تفنى » هو نص زائف . ما البديل الذى يمكنك قوله ؟

١١ – حين يسطع الضوء على سطح عاكس فى الفراغ فان ضغطا يقع على هذا السطح بواسطة الضوء .
اشرح هذا . هل يكون الضغط مختلفا لو أن السطح كان أسود بحيث يمتص الضوء ؟

١٢ – لو أن كل طاقة الكتلة للوقود قد استغلت فكم من الكيلوجرامات من الوقود يكفى لتغطية احتياجات مدينة ذات 300,000 نسمة من الطاقة لمدة عام واحد ؟ (ق)

١٣ – لو أننا صدقنا علاقات عدم اليقين فلماذا نرفض تصديق أن كل أنواع الحركة الجزيئية تتوقف عند الصفر المطلق لدرجات الحرارة ؟

١٤ – قدر التغير فى القدرة لنظام هوائى تابع لمحطة إذاعة محلية عندما تتغير من حالة طاقة تذبذب مكماة الى حالة أخرى مجاورة . ما هى فوتونات الطاقة التى تشعها المحطة ؟ وكم يبلغ طولها الموجى ؟ وما التردد ؟ (ق)

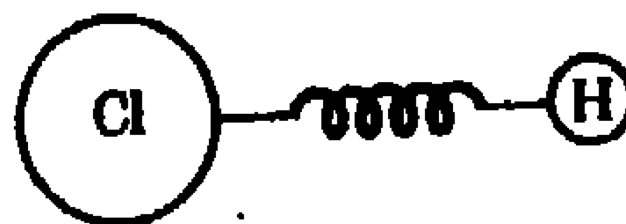
١٥ – يسبب الضوء فوق البنفسجى لفحة الشمس أما الضوء المرئى فلا يسببها . اشرح السبب . يعد بعض الناس أن جلودهم تلفح بالشمس أسهل ما يمكن عندما تكون مبتلة . هل ترى أن هناك سببا ما لذلك ؟

مسائل

١ – يتصرف جزىء كلوريد الايدروجين فى كثير من الاحيان مثل كرتين يربطهما زنبرك كما فى الشكل م ٢٦ – ١ وهو يهتز جيئة وذهابا (عند مط الزنبرك وكبسه) بتردد طبيعى يبلغ 8.5×10^{13} Hz . ما هى فجوة الطاقة بين الطاقات المسموحة لهذا المذبذب ؟ عبر عن إجابتك بكل من الجول والالكترون فولت .

٢ – يبث ليزر الهليوم نيون ضوءا أحمر طوله الموجى $\lambda = 6.328 \times 10^{-7}$ m ما هى طاقة الفوتون فى مثل ذلك الشعاع ؟ عبر عن إجابتك بكل من الجول والالكترون فولت .

٣ – من المناسب تذكر أن الفوتونات التى طاقتها 1 ev يكون طولها الموجى 1240 mm (أ) اثبت هذه الحقيقة . (ب) أى أجزاء الطيف هذا ؟ (حـ) ما هو الطول الموجى المناظر لفوتون طاقته 3 ev ؟



شكل (م ٢٦ – ١)

٤ – اوجد دالة الشغل لمادة الطول الموجى المشرف لها هو 3.3×10^{-7} m ، عبر عن إجابتك بالالكترون فولت .
٥ – (أ) اوجد الطول الموجى المشرف لمادة « الذهب » الذى دالة شغله هى 4.8 ev . (ب) فى أى أجزاء الطيف يقع هذا الطول الموجى ؟
٦ – (أ) اوجد طاقة كمات موجة ك.م. تبعث بها محطة اذاعة تعمل عند تردد 1 Mc . عبر عن الإجابة بالالكترون فولت . (ب) كم تبلغ سرعة الكترون له مثل هذه الطاقة الحركية ؟
٧ – يبلغ متوسط ط.ح الحرارية الانتقالية لجسيم ما $\frac{3}{2}kT$ (أ) كم يبلغ الطول الموجى لفوتون يكافىء هذا المتوسط للطاقة الحرارية عند 27°c . (ب) أى أنواع الإشعاع هذا ؟
٨ – يسطع ضوء طوله الموجى 400 nm على سطح دالة شغله 2.0 ev اوجد سرعة أسرع الالكترونات الكهرضوئية المبتعثة من السطح .
٩ – يبلغ جهد الإيقاف لمادة ما 0.30 V حين يقاس بواسطة إسقاط ضوء طوله الموجى 400 nm على سطح المادة . ما هى دالة الشغل هذه المادة ؟
١٠ – تبلغ طاقة رابطة الكربون – كربون لجزىء عضوى حوالى 80 kcal/ mol . لو أمكن استخدام كل طاقة فوتون ما لكسر هذه الرابطة فما الطول الموجى لتلك الفوتونات اللازمة لإنجاز هذه المهمة بالضبط ؟
تلميح : 80 kcal/ mol تساوى $80,000/(6 \times 10^{23})$ cal per bond
١١ – تلزم طاقة مقدارها 13.6 ev لإطلاق سراح الكترون من ذرة الايدروجين أى لتأين الذرة . لو أن هذا تم عن طريق صك الذرة بواسطة فوتون ، فما هو أطول طول موجى لفوتون يستطيع إنجاز هذه المهمة ؟ (اعتبر أن كل طاقة الفوتون فعالة) .
١٢ – حسب التقديرات الفلكية الأرضية تبلغ المسافة إلى النجم اركتوروس (السماك الرامح) حوالى 40 سنة ضوئية . كم من السنين تلزم سفينة فضاء كى تصل إلى هناك إذا كانت سرعتها تبلغ $0.990c$ بالنسبة للأرض وذلك حسب (أ) الساعات الأرضية و (ب) ساعات سفينة الفضاء ؟

١٣ – يعيش النيوترون الوحيد الساكن حوالى 1000 s قبل أن يتغير إلى شىء ما آخر . هل يمكن لنيوترون قذف من الشمس بسرعة $0.995c$ أن يصل إلى كوكب زحل قبل أن يغير صورته ؟ (يبعد كوكب زحل عن الشمس حوالى 1.5×10^{12} m) .
١٤** – يعيش ميزون K^+ حوالى 10^{-8}s قبل أن يغير صورته . كم يجب أن تكون سرعة هذا الميزون خلال المعمل حتى يمكنه أن يعيش ليقطع طول المعمل البالغ 15 m ؟
١٥* – تعجل الجسيمات فى المعجلات النووية الحديثة أحيانا الى طاقات تبلغ بلايينا من الالكترون فولت (أ) ما هى كتلة بروتون طاقته 2×10^{9} e.v ؟ (ب) كم تبلغ سرعته ؟ ($m_0 = 1.67 \times 10^{-27}$ Kg)
١٦ – تلزم طاقة مقدارها 80 cal لاذابة 1g من الثلج عند درجة حرارة 0°C . ما مقدار الزيادة فى كتلة الثلج بسبب الطاقة التى استخدمت لاذابته ؟
١٧ – يقول الكيميائيون أحيانا أن « كتلة المواد الداخلة فى التفاعل تساوى كتلة المواد الناتجة » فى تفاعل كيميائى . عند إحراق 2g من الايدروجين مع 16g من الأكسجين لتكوين 18 g من الماء فإن التفاعل ينتج عنه أيضا 60,000 cal من الطاقة الحرارية . ما مقدار الكتلة المفقودة فى العملية ؟
١٨ – عند السرعات المنخفضة لو أن رجلا يتحرك بسرعة v بالنسبة للأرض يقذف قذيفة على طول خط حركته بسرعة u بالنسبة لنفسه ، فإن سرعة القذيفة بالنسبة للأرض ستكون ببساطة $v + u$ ولا يمكن أن يكون هذا صحيحا عند السرعات القريبة من c ، وذلك لأن سرعات أكبر c سيمكن عندئذ التنبؤ بها (لو كانت $v = 0.7c$ مثلا وكانت $u = 0.7c$; فإن السرعة بالنسبة للأرض ستكون $1.4c$ وهذا مستحيل) . وقد بين أينشتين أن السرعة فى هذه الحالة ستعطى بالمعادلة :

$$\frac{v + u}{1 + vu/c^2}$$

والآن ، لو أن سفينة فضاء سرعتها $0.7\ c$ عبر الأرض وتقذف قذيفة من داخلها فى اتجاه خط حركتها بسرعة $0.9\ c$ فما هى سرعة القذيفة بالنسبة للأرض ؟

١٩ – كرر المسألة رقم ١٨ مع استبدال نبضة ضوء بالقذيفة .

٢٠ – ما هو الطول الموجى المصاحب لالكترون هبط فى فرق للجهد مقدارة $6V$ ؟

٢١ – يبلغ نصف قطر الذرات حوالى $1\ \text{Å}$. كم تبلغ سرعة الكترون إذا كان الطول الموجى المصاحب له أصغر من $1\ \text{Å}$ ؟

٢٢** – يبلغ قطر النوى حوالى $4 \times 10^{-15}\ m$ ، ولكى يمكن للنيوترون أن يتواجد بداخل النواة يلزم أن يكون عدم اليقين المتأصل فى موضعه أقل من $4 \times 10^{-15}\ m$ ، ويعنى هذا أن يكون الطول الموجى المصاحب للنيوترون أقل من هذا المقدار . اوجد – بإهمال التأثيرات النسبية – السرعة التى يجب أن يتحرك بها النيوترون حتى يصبح الطول الموجى المصاحب له هو 1×10^{-15} (كتلة النيوترون $= 1.67 \times 10^{-27}\ kg$)

٢٣** – فوتون طوله الموجى λ يصدم الكترونا (ساكنا فى البداية) صدمة مباشرة ثم يرتد الإثنان بمرونة . بافتراض أن الحركة كلها قد تمت على طول نفس الخط المستقيم ، (أ) بين أن السرعة v للالكترون بعد التصادم والطول الموجى النهائى للفوتون تعطى بالمعادلات :

بشرط أن $v \ll c$

$$v = \frac{1.46 \times 10^{-3}}{\lambda}\ \text{m/s}$$

و

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda} - \frac{mv^2}{2hc}$$

(ب) احسب كلا من v و λ' اذا كانت $\lambda = 1.00\ \text{nm}$

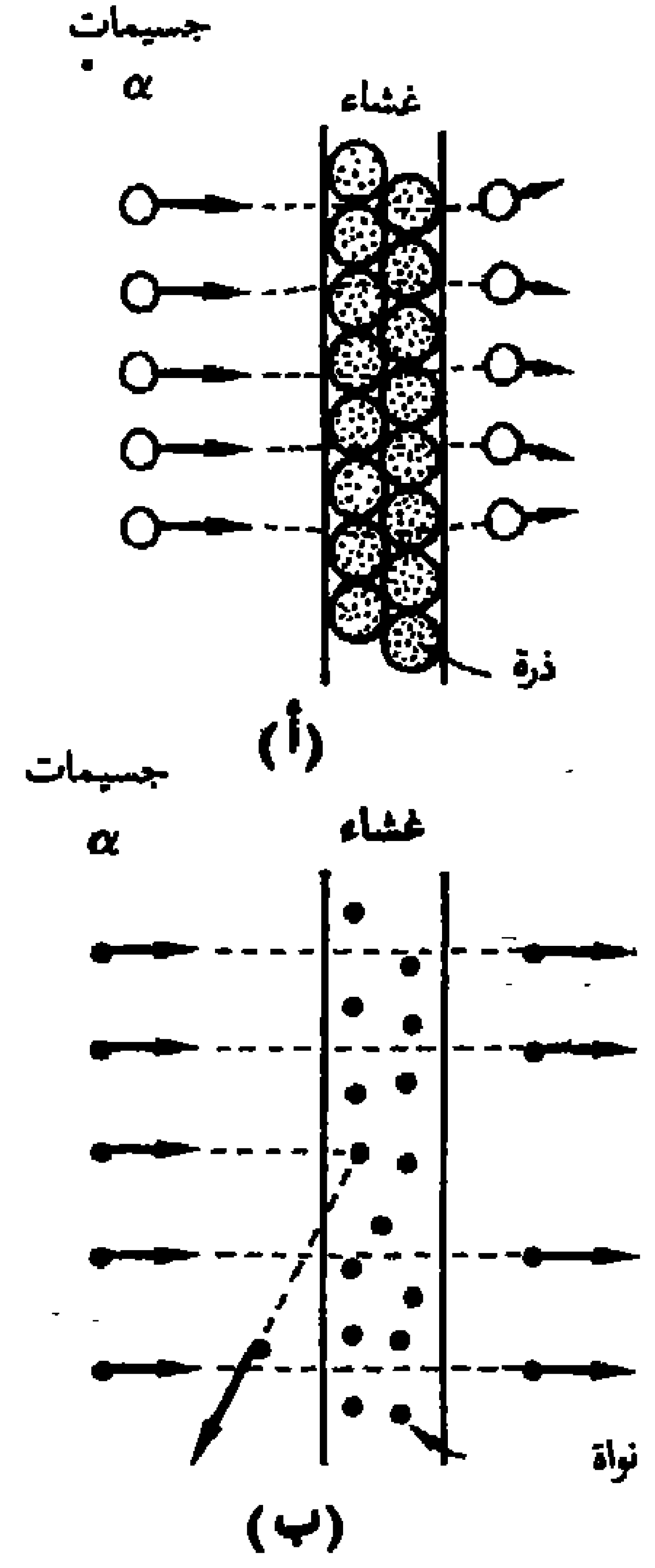
الفصل السابع والعشرون

التركيب الذرى وابتعاث الضوء

رأينا فى الفصل السابق أن السنوات التى تلت عام ١٩٠٠ شهدت تقدماً سريعا فى الفيزياء . وسنرى فى هذا الفصل كيف امتدت هذه التطورات لتفسير تركيب الذرات وتفاعلها مع الموجات الكهرمغناطيسية . ولكن قبل أن نبدأ هذا سنتكلم أولا عن تجربة هامة أسهمت إسهاما ضخما فى فهمنا للتركيب الذرى .

٢٧ - ١ الذرة النووية

ظل التركيب الذرى حتى مطلع هذا القرن غامضا . وقد كان من المعروف أن كل ذرة يصنحبها عدد من الالكترونات Z مساو للعدد الذرى للعنصر المقصود . ولما كانت كل ذرة متعادلة كهربيا ، لذا فالشحنة Ze - التى تحملها الالكترونات فى ذرة ما يجب أن تتوازن مع شحنة موجبة مقدراها Ze + ، وبالاضافة إلى ذلك يشكل هذا العدد Z من الالكترونات جزءا ضئيلا جداً من الكتلة الكلية للذرة ، ومن ثم فلابد أن تحتوى الذرة إلى جانب الالكترونات على كتلة تقارب كتلة الذرة نفسها وشحنة موجبة مقدارها Ze .



شكل (٢٧ - ١)
(أ) حسب نموذج طومسون للذرة فإن جسيمات ألفا الساقطة يجب أن تنحرف انحرافا ضئيلا . (ب) أما رذرفورد فقد لاحظ هذه النتيجة فى الواقع ، حجم النواة مبالغ فيه والالكترونات غير مبينة بالرسم .

لقد تمت معرفة كيف تترتب الالكترونات والشحنات الموجبة والكتلة داخل الذرات لأول مرة على يد ارنست رذرفورد ومساعديه عام ١٩١١ من خلال التجارب القاطعة التى أجروها . وتبدو فى الشكل ٢٧ - ١ الفكرة الأساسية وراء هذه التجارب . فهناك شعاع من جسيمات (جسيمات ألفا) يسقط على غشاء رقيق من ذرات الذهب . وهذه الجسيمات تنبعث من عنصر الراديوم المشع . تحمل هذه الجسيمات شحنة 2e + كما هو معروف ، أما كتلتها فتساوى تقريبا كتلة الذرة التى تلى أصغر الذرات وهى الهليوم . حيث أن ذرة الذهب لها كتلة تبلغ خمسين ضعفا لكتلة جسيم ألفا ، لذا يمكن تصور الموقف كما هو مبين فى الشكل ٢٧ — ١ .

يسمى نموذج الذرة المبين فى الشكل **نموذج طومسون للذرة** (نسبة إلى أول من اقترحه ج.ج. طومسون) . ويفترض فى هذا النموذج أن الذرة تتكون من كتلة كروية متجانسة إلى حد ما تحتوى على الشحنات الموجبة والسالبة للذرة وهى موزعة بداخلها . وحيث أن الغشاء المستخدم هدفا كان سمكة يبلغ حوالى مائة ذرة ، لذا فنموذج طومسون كان يتنبأ بأن جسيم α سيبطىء وقد يتوقف تماما فى الغشاء ، فى حين أن النتائج العملية بدت مختلفة تماما .

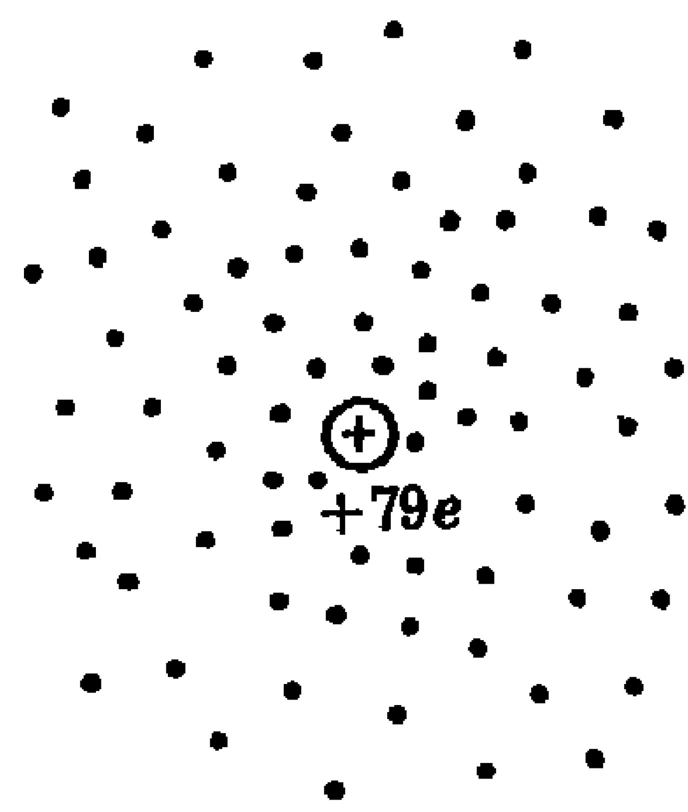
لقد وجد ، فى المقام الأول ، أن نسبة مئوية ضئيلة فقط من جسيمات α هى التى تأثرت على الإطلاق لوجود الغشاء . وبدا الأمر كما لو كان الغشاء مليئاً بالثقوب التى نفذت معظم جسيمات α من خلالها وكل ما طرأ عليها هو بعض الإبطاء — إن وجد . أما النتيجة الثانية غير المتوقعة فكانت حول تلك النسبة الضئيلة من الجسيمات التى بدت وكأنها تصادمت مع شيء ما ، فبعضها انحرف بزوايا كبيرة جدا كما لو كانت قد اصطدمت بشيء جسيم . وعلى سبيل المثال انحرفت بعض الجسيمات عائدة إلى الخلف تقريبا كما فى الشكل ٢٧ - ١ (ب) .

الذرة النووية

ولكى يفسر هذه النتائج افترض رذرفورد ما يسمى **بالذرة النووية** ، وقد دلته تجاربه على أن الذرة لابد وأن تحتوى على قلب ضئيل ولكنه ثقيل جدا ، يحمل كل شحنة الذرة الموجبة كما يحمل كل كتلتها تقريبا . ويبلغ قطر تلك الكرة موجبة الشحنة (**أو النواة**) حوالى 10^{-14} m أو أقل عند مركز الذرة . على أن قطر الذرات كما يحسب من كثافة البللورات يصل كما هو معروف إلى 10^{-10} m . أى أن النواة لو صورت على أنها كرة موجبة الشحنة وقطرها 1 mm تقريبا فإن الذرة إذا رسمت بنفس مقياس الرسم لكان نصف قطرها حوالى 10 m . لذا يصبح مستحيلًا علينا أن نرسم شكلا بمقياس رسم مناسب للذرة النووية ، وذلك لأنه لو رسمت الذرة داخل الصفحة فإن النواة ستكون أصغر من أن ترى .

العدد الذرى وعدد الالكترونات

لقد كانت ذرات الجدول الدورى معروفة من سلوكها الكيميائى بأنها تحتوى على عدد من الالكترونات يساوى العدد الذرى لذلك العنصر . فالايدروجين مثلا هو أول عنصر فى الجدول الدورى ولما كان عدده الذرى 1 فإنه يمتلك الكترونا واحدا . وبالمثل ، فالذهب هو العنصر التاسع والسبعون فى الجدول وهو لهذا يمتلك 79 الكترونا . وقد افترض رذرفورد أنه لما كانت الذرة متعادلة كهربيا ، فإن النواة يجب أن تحمل شحنة قدرها $79e$ + ويحتوى الحيز الضخم خارج النواة على 79 الكترونا للذرة كما هو مبين تخطيطيا فى الشكل ٢٧ – ٢ . ولما كانت الالكترونات صغيرة جدا أيضا فإن الجزء الرئيسى من الذرة يبدو وكأنه فراغ لا يسبب أى انحراف للجسيمات المقذوفة . ومنذ زمن رذرفورد ، أخذت الصورة النووية للذرة التى وضعها تتأكد تماما مع الأيام . وسنستخدم هذا النموذج لشرح نواح أخرى للسلوك الذرى .



شكل (٢٧ – ٢)
صور نموذج رذرفورد الذرى النواة على أنها تقع فى مركز منطقة كروية تحتوى على الالكترونات ولابد أن نذكر أن كلا من الالكترونات والنواة أصغر بكثير جدا جدا عما هو مبين .

ويوضح الشكل ٢٧ – ٣ صورة تخطيطية لذرة الكربون تتفق مع نتائج رذرفورد . وحجم النواة والالكترونات لن يزيد على حجم وخزات دبوس إذا ما كان حجم الذرة كما هو موضح بالشكل ، على أن الصورة المعطاة لا يمكن قبولها كما هى لأنها ليست متزنة ميكانيكيا . فالنواة الموجبة تقوم بجذب الالكترونات السالبة الستة التى ستلتحم بالنواة وتتعادل . ويمكن فى الواقع إثبات أن القوى الالكتروستاتية بمفردها ليست قادرة على الاحتفاظ بمجموعة ساكنة من الشحنات فى وضع اتزان استاتى ، ومن ثم فلا سبيل إلى ترتيب الالكترونات الساكنة والنواة فى الفضاء بحيث تظل مثبتة فى أماكنها .

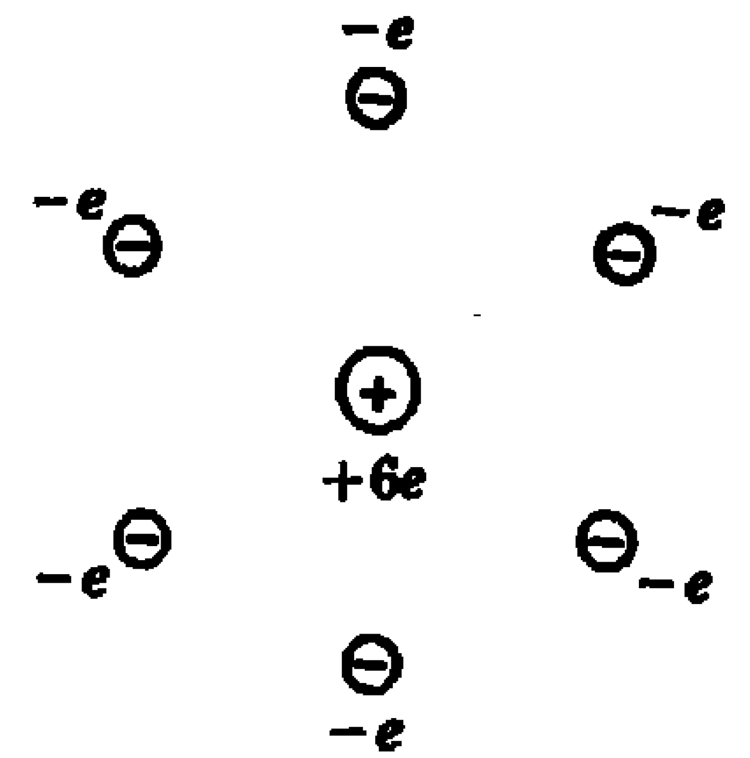
وقد نفترض أن الالكترونات ربما كانت تلف حول النواة بنفس الطريقة التى تلف بها الكواكب حول الشمس ، وتقوم قوى التربيع العكسى للجذب بتوفير قوة الجذب

---

* يمكن إيجاد عدد الذرات فى وحدة الحجوم بقسمة الكتلة لوحدة الحجوم ، أى الكثافة على وزن ذرة واحدة . ويمكن بعد ذلك اعتبار الحجم الذى تشغله ذرة واحدة على أنه مقلوب عدد الذرات لوحدة الحجوم .

المركزى اللازمة للإمساك بالكواكب فى مداراتها . ويمكن تطبيق نفس الموقف بالنسبة للذرة مع استخدام جذب التربيع العكسى الكولومى بدلا من قوى الجذب . وعلى الرغم من أن هذه الفكرة لها ما يحبذها ، إلا أنه كان هناك سبب طاغ لعدم تصديقها .

حين يدور الالكترون حول نواة موجبة فإنه يخلق فعليا زوجا متذبذباً من الشحنات وتتنبأ معادلات ماكسويل بأن مجموعة الشحنات المتذبذبة ستشع أمواجا كهرمغناطيسية بنفس الطريقة التى ناقشناها فى حالة الهوائى . أما إذا أشع المذبذب الذرى طاقة ، فإن مصيره الى الهبوط ، أى أن الالكترونات ستدور فى حلزون حول النواة حتى تحط عليها وتنهار الذرة ، وحيث أن شيئا من هذا لا يحدث فإن الفكرة من أساسها تكون خاطئة .



شكل (٧ - ٣)
صورة ممكنة ولكنها غير صحيحة للذرة الكربون .

من ناحية أخرى ، لو أن الذرة أشعت فعلا طاقة ، فإن هذا يكون تفسيرا مناسبا لحقيقة أن الذرات تبعث ضوءا فى بعض الأحيان . ومع هذا فإن التردد سوف يتغير لسوء الحظ عندما يهبط الالكترون للداخل نحو النواة مناقضا بهذا حقيقة أن ذرة معينة سوف تشع أطوالا موجية محددة بشكل دقيق جدا . وكما ترى فالموقف عام ١٩١٣ كان أبعد ما يكون عن الرضا وظل الناس وقتها يتحسسون إجابة شافية لهذه المشكلة .

٢٧ - ٢ طيف الايدروجين

على الرغم من أن الميكانيكا الذرية لم تكن مفهومة جيدا عام ١٩١٣ إلا أنه كانت هناك بيانات متاحة مفصلة ودقيقة عن الضوء الذى يصدر عن الذرات فقد شاع استعمال الاسبكترومترات (المطاييف) ذات المنشور وذات المحزوز لسنوات عديدة . وصار مجال الأطياف البصرية (أى ابتعاث الضوء من الذرات والجزيئات) مجالا للبحث المعملى الدءوب . وقد وجد الباحثون – من حيث المبدأ – أن أية كتلة غازية من الذرات يمكن جعلها تبتعث ضوءا إذا أمرت فيها شرارة أو تفريغ بواسطة مجسين عند جهد مرتفع . أما بالنسبة للمواد الصلبة بطبيعتها فإن الكتلة الغازية يمكن تدبيرها عن طريق تبخير الجسم الصلب فى قوس ساخن . ويمكن بعد ذلك دراسة الأطوال الموجية للضوء الصادر عن هذه الغازات الساخنة أى طيفها باستخدام سبكترومتر (مطياف) كما رأينا فى القسم ٢٥–٧ .

لما كان الايدروجين هو أبسط الذرات جميعا – إذ يحتوى على الكترون واحد – لذا كان من الطبيعى أن يحظى طيفه بعظيم الاهتمام . وكما أتضح فإن هذه الذرة لها فعلا طيف بسيط يتكون – كما وجد بالقياس – من متسلسلة من خطوط الطيف المبينة فى الشكل ٢٧–٤ . (لعلنا نذكر من القسم ٢٥ – ٧ أن خط الطيف هو فى الواقع

صورة لشق السبكترومتر (المطياف) وأن كل طول موجى يعطى صورة منفصلة) وتظهر الخطوط التى تقع فى المدى فوق البنفسجى القريب فى الصور الفوتوغرافية فقط بالطبع .

حد المتسلسلة

لاحظ أن الخطوط ذات الأطوال الموجية الأقصر تتقارب مع بعضها أكثر فأكثر ومع هذا فليس هناك خطوط طولها الموجى أقصر من $\lambda_\infty = 364.6$ nm (فى هذه المنطقة) ، وأن أقصر طول موجى هذا للمتسلسلة يسمى **حد المتسلسلة** . وحسب النظرية التى سنعرضها حالا فإن عدد الخطوط فى هذه المتسلسلة يجب أن يكون لانهائيا . أما ماتم تفريقه فهو 40 خطاً . أما الباقون فمتلاصقون جدا لدرجة يصعب تمييز أحدهم عن الآخر .

حيث أن خطوط الطيف هذه بدت وكان لها نوع محدد من النظام ، فقد يكون من الطبيعى أن تصاغ أطوالها الموجية فى صيغة تجريبية . وقد تم هذا على يد بالمر حوالى عام ١٨٨٥ وسميت هذه المتسلسلة باسمه ، متسلسلة بالمر ، فقد وجد أن الأطوال الموجية للخطوط يمكن التعبير عنها بالصيغة التالية المتناهية فى البساطة .

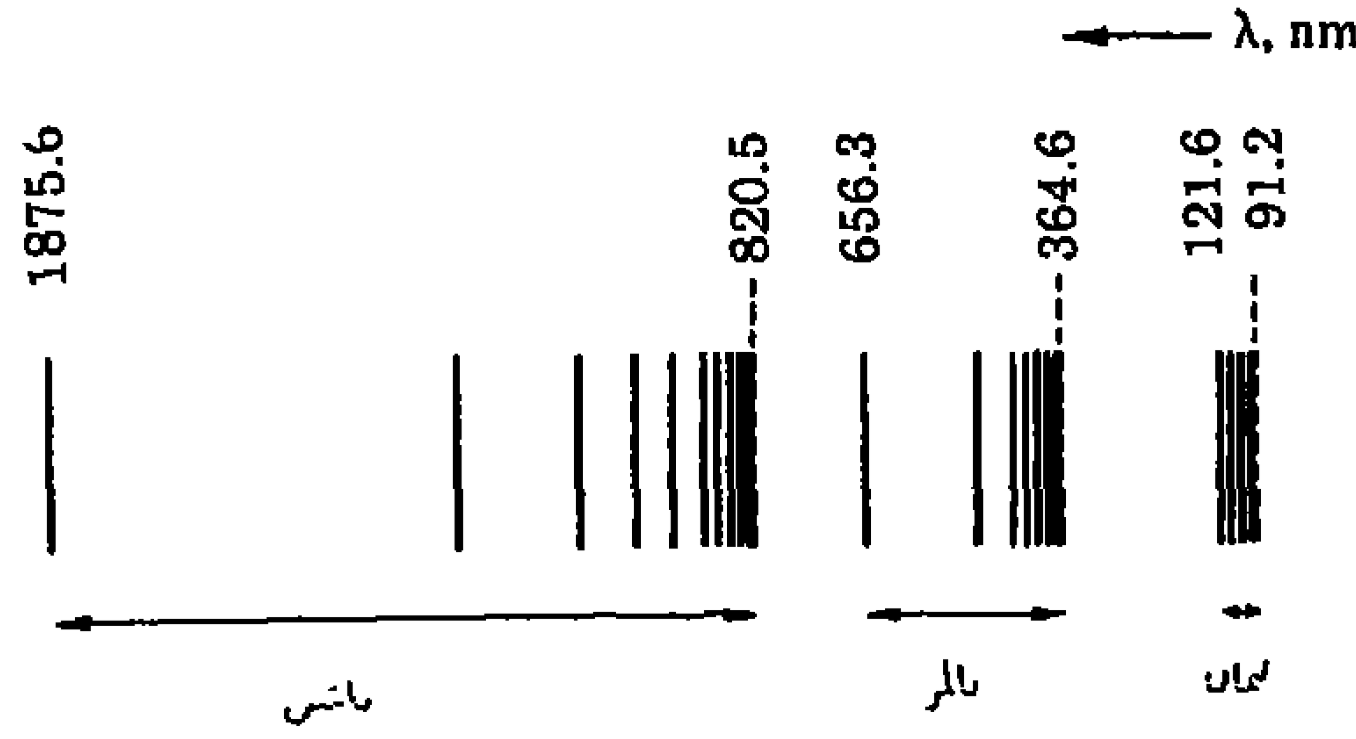
صيغة متسلسلة بالمر

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad ٢٧ - ١$$

حيث R مقدار ثابت قيمته $1.0974 \times 10^{7}\ m^{-1}$ واخ ... $n = 3,4,5,$. أما 2^2 فهى ببساطة 4 . إذا وضعنا $n = 3$ لوجدنا أن $\lambda = 656$ nm حسب هذه الصيغة ، وهذا هو أيضا أول خط فى متسلسلة بالمر وهو موضح فى الشكل ٢٧ - ٤. أما $n = 4$ فيعطى $\lambda = 486.2$ nm وهكذا . تؤدى الأعداد الصحيحة ابتداء من 3 إلى مالا نهاية إلى خطوط متسلسلة بالمر حين نعوض بها فى الصيغة (٢٧ - ١) . عند وضع $n = \infty$ فإن الصيغة تؤدى إلى حد المتسلسلة وهو 364.6 nm . والثابت التجريبى R يسمى **ثابت رايدبرج** تخليدا لاسم الرجل الذى عين قيمة هذا الثابت بدقة . ومن المعتاد أن يرمز إلى خطوط هذه المتسلسلة كالتالى : خط H_α ، خط H_β ، خط H_γ وهكذا .



شكل (٢٧ - ٤)
متسلسلة بالمر لخطوط الأيدروجين .



شكل (٢٧ ٥)
أقصر ثلاث متسلسلات طيفية للخطوط الصادرة عن ذرات الأيدروجين

وقد وجد فيما بعد أن ذرات الأيدروجين تبتعث أطوالا موجية غير تلك التى وجدت فى متسلسلة بالمر ، فتقع متسلسلة ليمان فى المنطقة القصية لفوق البنفسجى بينما تقع متسلسلة باشن فى المنطقة تحت الحمراء . وهذه المتسلسلات موضحة فى الشكل ٢٧ – ٥ . وقد وجدت متسلسلات أخرى أبعد من هذه داخل المنطقة تحت الحمراء . ومن المدهش أن هذه المتسلسلات تتبع أيضا صيغا شبيهة جدا بصيغة بالمر ، فلقد وجد أن

$$\text{Lyman:}\quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 2, 3, \ldots$$

$$\text{Balmer:}\quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 3, 4, \ldots \qquad ٢٧ - ٢$$

$$\text{Paschen:}\quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 4, 5, \ldots$$

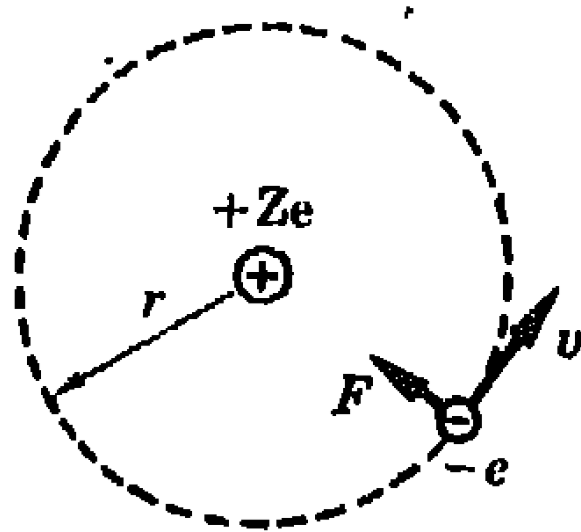
وهكذا ، حيث $R = 1.0974 \times 10^7\ m^{-1}$.

حقيقة أنها ليست مجرد مصادفة أن تنطبق هذه الصيغ البسيطة على ظاهرة معقدة كابتعاث الضوء . فمن الواضح أن هناك الكثير من البساطة فى السلوك الذرى يعتبر مسئولا عن هذه المجموعة الجديرة بالملاحظة من العلاقات ، ولذا فهى كفيلة بأن تكون اختبارا بسيطا للنظريات الذرية . وكما سنرى فإنها قد أمدت نيلز بوهر بالأدلة اللازمة لوضع أول تصور يمكن العمل به للذرة .

٢٧ – ٣ ذرة بوهر

فى عام ١٩١٣ ، وعندما كان نيلز بوهر يبلغ من العمر ثمانية وعشرين عاما ، وهو لا يزال طالب بحث فى كمبردج ، تقدم بصورة جديدة لذرة الأيدروجين . وقد بنى هذه الصورة على أساس الكترون يدور فى مدار دائرى حول النواة كمركز للدوران .

وقد وفر التجاذب الكهربى بين النواة والالكترون قوى الجذب المطلوبة للإمساك بالالكترون فى مداره . وهذا المفهوم موضح فى الشكل ٢٧ – ٦ حيث اعتبرت الشحنة على النواة على أنها Ze . وفى حالة ذرة الأيدروجين يعتبر العدد الذرى Z يساوى الواحد الصحيح .



شكل (٢٧ – ٦)
يفترض فى ذرة بوهر أن الالكترون يتحرك فى دائرة حول النواة ، وتتوفر قوى الجذب المركزى عن طريق التجاذب مع النواة .

يفيدنا قانون كولوم بأن القوة الكهربائيه المؤثرة على الالكترون هى $k(Ze^2/r^2)$ وتتجه نحو المركز ، حيث k مقدار ثابت قيمتة $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ وهذه القوة توفر قوى الجذب المركزى mv^2/r. ومن ثم يمكننا أن نكتب

$$\frac{kZe^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

وسعيا وراء mv^2 نجد أن ،

$$mv^2 = \frac{kZe^2}{r} \qquad ٢٧ - ٣$$

وليس فى هذه الأفكار شىء جديد بالطبع ، فكما قلنا منذ قليل فى بداية هذا الفصل ، أن الالكترون المتذبذب يجب أن يشع طاقة ومن ثم تنحدر الذرة ثم تنهار . ولهذا السبب لم تقبل هذه الصورة العامة بشكل عريض . وللتحايل على هذه المشكلة اتخذ بوهر موقفا بأنه ربما كانت الذرة لا تخضع للقوانين الكهربائية العادية وقد افترض – على سبيل المحاولة – أن الالكترون لا يشع أية طاقة على الرغم من أن هذا يتنافى مع السلوك الملحوظ للالكترونات المتذبذبة فى الهوائيات وفى أنظمة أخرى لا ذرية .

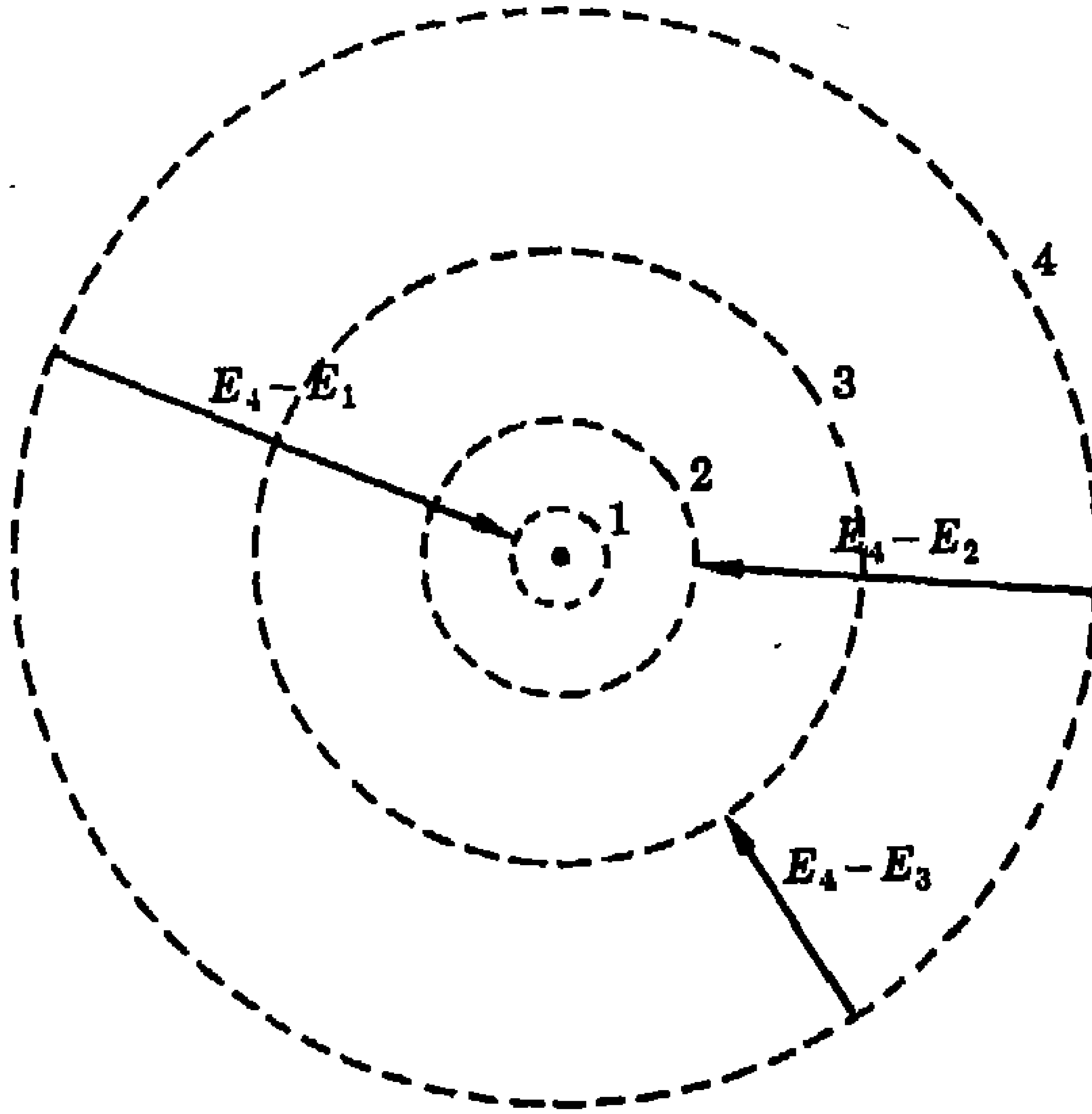
المدارت المستقرة المفترضة

دعنا نفترض – مع بوهر – بأن هناك مدارات خاصة يكون فيها الالكترون مستقرا أى أنه لا يشع أية طاقة . وتكون هذه المدارت شبيهة بما هو مبين فى الشكل ٢٧ – ٧ وإذا كان الالكترون فى المدار 2 فهو قد يهبط تحت ظروف معينة إلى المدار 1 . وحيث أن الالكترون مجذوب فى الواقع بواسطة النواة فهبوطة يكون « انحدارا » ويفقد بهذا طاقة وضع (ط.و) عندما يهبط من المدار 2 إلى المدار 1 . إذا كانت الطاقة الكلية للالكترون فى المدار n هى E_n وفى المدار p هى E_p ، فإن الالكترون يفقد طاقة مقدارها $E_n - E_p$ حين يهبط من المدار n إلى المدار p

الانبعاث المفترض للفوتونات

وحيث أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث فإن الطاقة المفقودة $E_n - E_p$ يجب أن تكون قد ذهبت إلى مكان ما . وقد افترض بوهر أنها قد أشعت ككم منفرد من الطاقة الضوئية ، $h\nu$ ومن ثم فقد كتبت المعادلة التالية لطاقة الفوتون المبتعث ،

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_n - E_p \quad (٢٧ - ٤)$$



شكل (٢٧ - ٧)
افترض بوهر مدارات دائرية مستقرة معينة حول نواة الذرة . والالكترون الموجود فى المدار 4 يستطيع مغادرة المدار عن طريق أى من الانتقالات الثلاثة المبينة .

ولننظر الآن ما هى النتائج التى يمكن استخلاصها من المعادلتين (٢٧ - ٣) و (٢٧ - ٤) . لإيجاد E_n ، نلاحظ أن للالكترون (ط.ح) و (ط.و) وأن ط.ح. له هى $\frac{1}{2}mv^2$ أو من المعادلة (٢٧ - ٣) يكون لدينا ،

$$\text{ط.ح} = \frac{Ze^2k}{2r}$$

حيث $k = 9 \times 10^9 \ N.m^2/C^2$ ، وتكون (ط.و.) للالكترون سالبة وذلك لأننا عرفنا (ط.و) على أنها صفر عند المالا نهاية وأنها تنخفض الى قيم أقل كلما اقترب الالكترون من النواة التى تجذبه . ويكون لدينا ،

$$\text{ط.و} = \frac{-Ze^2k}{r}$$

بجمع هذين الاسهامين معا ، نحصل على الطاقة الكلية ، أو

$$E = \frac{-Ze^2k}{2r} \quad (٢٧ - ٥)$$

لاحظ أن الطاقة تصبح أقل ، أى أكثر سالبية كلما صغرت قيمة r ، وهذا راجع إلى حقيقة أن (ط.و) يفقدها الالكترون عندما يهبط نحو النواة .

بالتعويض فى المعادلة (٢٧ - ٤) نجد أن ،

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{Ze^2k}{2}\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_n}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{Ze^2k}{2hc}\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_n}\right) \qquad ٢٧ - ٦$$

المعادلة (٢٧ - ٦) شبيهة جدا بالعلاقة التجريبية ، المعادلة (٢٧ - ٢) ، فكلتا المعادلتين تساوى مقلوب λ بالفرق بين حدين . وحيث أن أنصاف أقطار المدارات r_p و r_n مجهولة فإنه يصبح ممكنا أن نختارها بحيث تكون المعادلة (٢٧ - ٦) مطابقة تماما للمعادلة (٢٧ - ٢) . وفى ضوء نجاح بلانك وأينشتين فى تصوير الطاقة على أنها مكماة أى تصدر فى حزم صغيرة أو كمات ، فإن بوهر بحث عن كمية أخرى تعطى حين تكمى القيم الصحيحة لأنصاف أقطار المدارات . ووجد أن الاختيار الصحيح هو بالقول بأن عزم التحرك الزاوى للالكترون mvr يجب أن يكون مضاعفات صحيحة للمقدار $h/2\pi$ ، حيث h هو ثابت بلانك . ومن ثم كتب ،

كمية التحرك الزاوى مكماة

$$mvr_n = \frac{nh}{2\pi} \qquad (\ ٢٧ - ٧\ )$$

حيث n تساوى أى عدد صحيح و r_n هو نصف قطر المدار الذى رقمه n

وبحل المعادلة (٢٧ - ٧) سعيا وراء v ثم التعويض عن قيمتها فى المعادلة (٢٧ - ٣) ، توجد r_n كالتالى،

$$\frac{1}{r_n} = \left(\frac{4\pi^2Ze^2mk}{h^2}\right)\left(\frac{1}{n^2}\right) \qquad (\ ٢٧ - ٨\ )$$

وبالتعويض عن هذا (وكذا بالتعبير المشتق بطريقة مماثلة للكمية r_p) فى المعادلة (٢٧ - ٦) فإن ،

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{2\pi^2Z^2e^4mk^2}{h^3c}\right)\left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (\ ٢٧ - ٩\ )$$

وحسب هذه المعادلة ، عندما يهبط الالكترون من المدار n إلى المدار p فإن ضوءا يتعث ويكون طوله الموجى معطى بالمعادلة (٢٧ - ٩) . نلاحظ على الفور أن المعادلة (٢٧ - ٩) هى نفسها المعادلة (٢٧ - ٢) وهى المعادلة التجريبية . علاوة على ذلك ، إذا قدرت قيمة الثابت فى المعادلة (٢٧ - ٩) لثبت أنها مساوية لثابت رايدبرج R فى المعادلة (٢٧ - ٢) .

لقد اعتبر اشتقاق بوهر المعادلة (٢٧ – ٩) نجاحا جديرا بالملاحظة لأنها تتنبأ بدقة واضحة بالأطوال الموجية المعروفة التى تبتعثها ذرات الأيدروجين . ولأول مرة يتمكن الفيزيائيون من اشتقاق صورة كمية لابتعاث الضوء من الذرات . وقد وضع بوهر وهو بصدد هذا الاشتقاق – فرضين خارجين على المألوف بالإضافة إلى استخدام أفكار بلانك وأينشتين حول طاقة كم الضوء . فقد افترض أن هناك مدارات الكترونية مستقرة معينة يدور فيها الالكترون دون أن يشع أية طاقة . كما افترض أن هذه المدارات كانت بحيث أن كمية التحرك الزاوى للالكترون تساوى مضاعفات صحيحة للمقدار $h/2\pi$.

فإذا ما ووجه بوهر بالضغط حتى يبرر وضع هذين الفرضين ، فإن عليه أن يقول بأن التبرير الوحيد هو أنهما يعملان جيدا . فعلة صحتهما لم تكن معروفة . ومع هذا ففى حين أن هذه الفروض تبدو متناقضة مع خبرتنا بالأشياء العادية ، إلا أن الذرة ليست شيئا عاديا . وليس لدينا سبب حقيقى أن نمتنع عن الاعتقاد بأن الالكترونات فى الذرة تسلك كما افترض بوهر . والحقيقة القائمة أن فروضه أدت إلى نتائج صحيحة تجبرنا على استنتاج أن هذه الفروض ربما كانت صحيحة . وكما سنرى فيما بعد فى هذا الفصل ، فإن الاتجاه الحديث هو الأخذ بفروض بوهر بشكل عام ولكن مع استبدال أنماط فضائية أكثر تعقيدا بالصورة التفصيلية التى ذكرها للمدارات الالكترونية .

٢٧ – ٤ انبعاث الضوء من ذرة بوهر

رأينا فى الفصل السابق أنه حسب بوهر فان الكترون الأيدروجين يستطيع الدوران فى أى واحد من المدارات المستقرة العديدة حول النواة ، وتعطى أنصاف أقطار هذه المدارات بالمعادلة (٢٧ – ٨) . وإذا قدرنا قيمة الثابت فى تلك العلاقة لوجدنا أن المدارات الالكترونية المستقرة (المسموح بها) فى الأيدروجين هى كالتالى :

$$n = 1: \quad r_1 = 0.53 \times 10^{-10}\ \text{m}$$
$$n = 2: \quad r_2 = (4)(0.53 \times 10^{-10})\ \text{m}$$
$$n = 3: \quad r_3 = (9)(0.53 \times 10^{-10})\ \text{m}$$

وهكذا . وهذه المدارات مصورة فى الشكل ٢٧ – ٧ . لاحظ أن النسبة بين أنصاف أقطار هذه المدارات هى كالنسبة $1 = 2^2 = 3^2 = 4^2$ الخ

لقد تعلمنا فى الميكانيكا والديناميكا الحرارية أن نظاما ما سيظل يفقد من طاقته حتى يصبح من المستحيل فقد المزيد من الطاقة . وهذا ما يفسر لماذ يتوقف البندول

فى النهاية عن التأرجح لماذا تسقط الكرة على الأرض . وبالمثل فان الالكترون فى ذرة الأيدروجين سيفقد فى نهاية الأمر أقصى ما يمكن فقدة من الطاقة وكما رأينا فالالكترون يفقد طاقة عندما يهبط بالقرب من النواة ، على أنه لا يستطيع الأقتراب أكثر من المدار 1 لأنه لا يوجد مدار أصغر يمكنة الهبوط اليه . ويقال عن الذرة التى هبط فيها الالكترون الى أدنى مستويات الطاقة أنها غير مستثارة وتكون الذرة مستقرة فى حالة الطاقة هذه ولا تبعث أى ضوء كما أن طاقتها الكلية هى E_1 .

هناك قدر من الشغل اللازم لرفع (أو استثارة) الالكترون من أدنى حالات الطاقة (المدار) الى واحد من المدارات الأعلى أو مستويات الطاقة . والالكترون لا ستطيع الحركة الى المدار 2 أو أى مدار أعلى من تلقاء نفسه . على أن الذرة اذا قذفت بجسيمات أو ذرات أخرى فان التصادم مع الالكترون قد يعطيها ما يكفى من الطاقة حتى ترتفع الى مدار ذى طاقة أعلى .

افترض أن الالكترون قد أطيح به الى المدار 4 مثلا ، كما هو مبين فى الشكل ٢٧ — ٧ . وعلى الرغم من أن الالكترون مستقر نسبيا فى هذه الحالة الا أنه سيهبط الى حالة طاقة أدنى (أو مدار) خلال كسر صغير جدا من الثانية . وحين يفعل ذلك فانه يفقد طاقة ويبتعث كم من الضوء أو فوتون . فالالكترون ستطيع أن يهبط مباشرة ، مثلا ، من المدار 4 الى المدار 2 وحسب المعادلة ٢٧ — ٩ فان الطول الموجى للضوء المبتعث نتيجة لهذا الانتقال هو ،

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right)$$

حيث استبدل بالمقدار الثابت قيمتة المقاسة وهى ثابت رايدبرج . لاحظ أن هذا الطول الموجى . حسب المعادلة (٢٧ — ٢) هو الخط الثانى فى متسلسلة بالمر .

وبالمثل ، اذا هبط الالكترون مباشرة الى المدار 1 فان لطول الموجى يكون ،

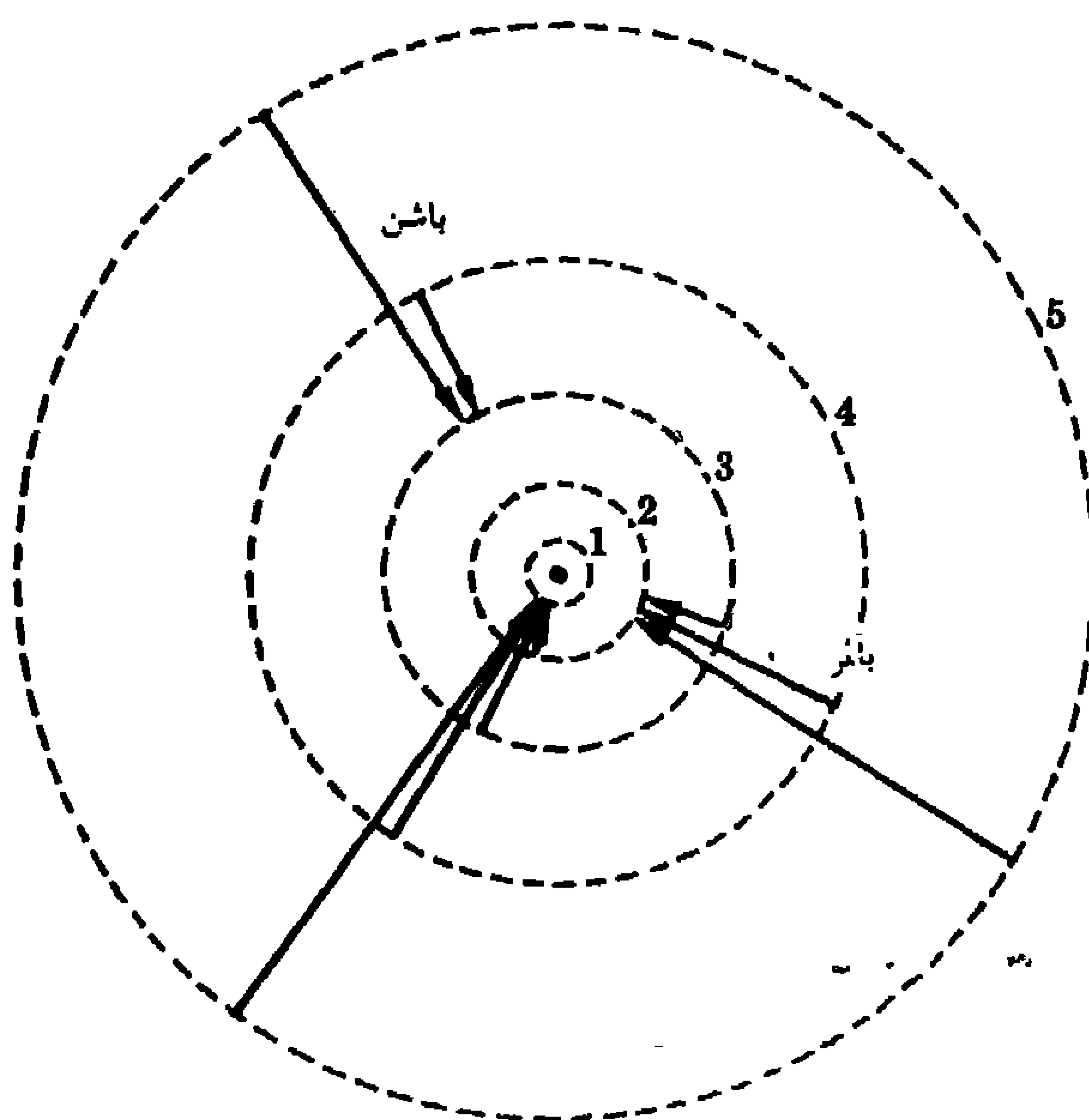
$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2}\right)$$

وهو الخط الثالث فى متسلسلة ليمان . لاحظ أن الالكترون قد هبط هنا خلال فرق أكبر فى الطاقة فى هذه الحالة ، ولذا فالضوء المبتعث سيكون ذا طاقة أعلى وطول موجى أقصر — هذا مناسب تماما حيث أننا نعرف أن متسلسلة ليمان تقع فى الجزء فوق البنفسجى القصى من الطيف بينما تقع متسلسلة بالمر فى الجزء المرئى من الطيف .

من الطبيعي أن الالكترون قد يهبط أيضا من الحالة 4 الى الحالة 3 مما يشكل خطا في متسلسلة باشن . نلاحظ أنه لو هبط الكترون من مدار خارجي الى المدار الأول لابتعث خط في متسلسلة ليمان . أما اذا هبط الى حالة الطاقة 2 لا بتعث طول موجي في متسلسلة بالمر أما الانتقال الى المستوى 3 فينتج عنه خط في متسلسلة باشن وهذا كله موضح في الشكل ٢٧ – ٨ .

أصل حد المتسلسلة

يبتعث خط حد المتسلسلة عندما يهبط الالكترون من خارج الذرة الى أدنى حالة طاقة لهذه المتسلسلة المعينة . فحين يهبط الالكترون من المدار 3 الى 2 ، يبتعث أول خط في متسلسلة بالمر واذا هبط من 4 الى 2 ينتج الخط الثاني لمتسلسلة بالمر . وفي الواقع يتضاءل فرق الطاقة بين المستويات بسرعة كلما ذهبنا الى المدارات العليا ومن ثم فان مقدار الطاقة المبتعثة حين يهبط الالكترون من المدار 10 الى المدار 2 هو بالتقريب ما يبتعث حين يهبط من المدار 100 الى 2 . ويعني هذا أن خطوط متسلسلة بالمر تصبح متلاصقة جدا كلما اقتربنا من الأطوال الموجية المبتعثة بانتقالات من المدارات الخارجية الى المدار 2 ومن الطبيعي أن أكبر طاقة تبتعث اذا هبط الالكترون من خارج الذرة ($n \rightarrow \infty$) الى المدار 2 . وهذا هو ما يؤدي الى ابتعاث الطول الموجي لحد المتسلسلة



شكل (٢٧ – ٨)
يهبط الالكترون دائما الى نفس المدار الداخلي في حالة متسلسلة طيفية منفردة

٢٧ - ٥ الرسوم البيانية لمستويات الطاقة

من المناسب دائما أن يحصر الانسان اهتمامه فى طاقات الالكترون (والذرة) دون أن يلقى بالا الى هندسة المدارات ، الخ . فالانسان يهتم فى الواقع ، بالطاقات فقط نظرا لأنها هى وحدها التى تؤثر على الأطوال الموجية للضوء المبتعث من الذرة . ولذا فاننا نستخدم **رسما بيانيا لمستويات الطاقة** لذرة ما (ولنظم أخرى كثيرة كذلك) . ولننظر الآن كيف يكون هذا الرسم البيانى لذرة الأيدروجين .

لقد رأينا فى المعادلة (٢٧ - ٥) أن الطاقة الاجمالية لذرة الأيدروجين ، عندما يكون الالكترون فى المدار n هى ،

$$-E_n = \frac{Ze^2k}{2r_n} \qquad (\text{٢٧ - ٥})$$

ولكن $1/r_n$ يمكن ايجادها من المعادلة (٢٧ - ٨) وحين يعوض بها فى المعادلة (٢٧ - ٥) نجد ،

$$E_n = -\left(\frac{2\pi^2k^2e^4Z^2m}{h^2}\right)\left(\frac{1}{n^2}\right) \qquad (\text{٢٧ - ١٠})$$

عند تقدير قيمة الثابت (وتذكر أن $Z = 1$ لأن شحنة نواة الأيدروجين $+1e$) فاننا نجد الطاقة بالالكترون فولت ،

طاقات ذرة بوهر

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \quad \text{eV} \qquad (\text{٢٧ - ١١})$$

يتضح من هذه المعادلة أن طاقة الذرة تكون صفرا عندما $n \to \infty$ ولاشك أنك ستتذكر أن هذه هى نتيجة الطريقة التى عرفنا بها صفر طاقة الوضع ، تكون ط.و صفرا عندما يكون الالكترون والنواة على مسافة لا نهائية من بعضهما البعض وعندما $n \to \infty$ فان $r_n \to \infty$. وبالاضافة الى هذا ، عندما $n = 1$ ويكون الالكترون فى أول مدار له ، فان $E_1 = -13.6$ eV هذا ما نسمية **الحالة الأرضية** للذرة . وبالمثل عندما $n = 2$ يكون الالكترون فى المدار الثانى $E_2 = -3.4$ eV وهكذا . ويوضح الشكل ٢٧ - ٩ أ الرسم البيانى لمستويات الطاقة الذى يصور هذه الطاقات لذرة الأيدروجين وهو ببساطة عبارة عن مجموعة من الخطوط الأفقية رسمت بحيث تبين الطاقات المختلفة التى يمكن للذرة أن تتخذها .

أما الجزء (ب) من الشكل فيبين كيفية تمثيل خطوط الطيف المختلفة - والتى تبعث بها ذرة الأيدروجين - على مثل هذا الرسم البيانى . ويكون طول سهم الانتقال على هذا النوع من الرسوم البيانية مقياسا مباشرا للطاقة المتضمنة . وعلى هذا فأسهم

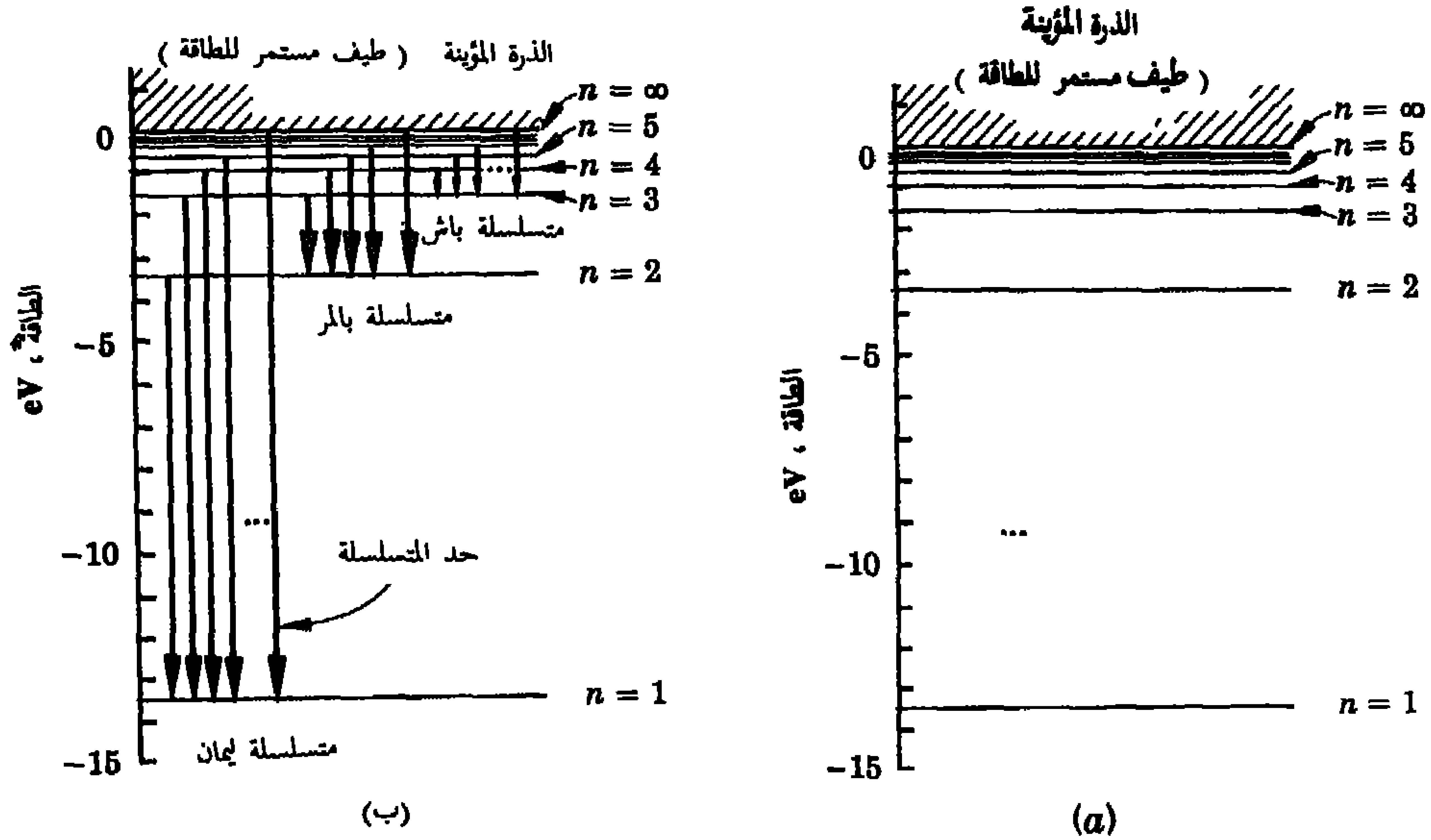
متسلسلة ليمان ستكون أقصر . ومن السهل أيضا الاستنتاج من هذا الرسم أن خطوط الطيف فى متسلسلة يتم فيها الانتقال من قيم كبيرة n ستقع متقاربة جدا مع بعضها البعض وذلك لأن مستويات الطاقة تلك لها تقريبا نفس قيمة الطاقة .

مثال توضيحى ٢٧ - ١ الهليوم وحيد التأين هو ذرة هليوم فقدت واحدا من الكتروناتها الاثنين . ارسم رسما بيانيا لمستويات الطاقة لهذا الأيون .

طريقة الحل .يشبه الهليوم وحيد التأين كثيرا ذرة ايدروجين باستثناء شحنة النواة التى تبلغ $+2e$. أى أن $Z = 2$. من المعادلتين (٢٧ - ١٠) و (٢٧ - ١١) بوضع $Z = 2$ ،

$$E_n = -\frac{54.4}{n^2} \quad \text{eV}$$

شكل (٢٧ - ٩)
(أ) الرسم البيانى لمستويات الطاقة فى الأيدروجين . (ب) أصل المتسلسلات الطيفية .



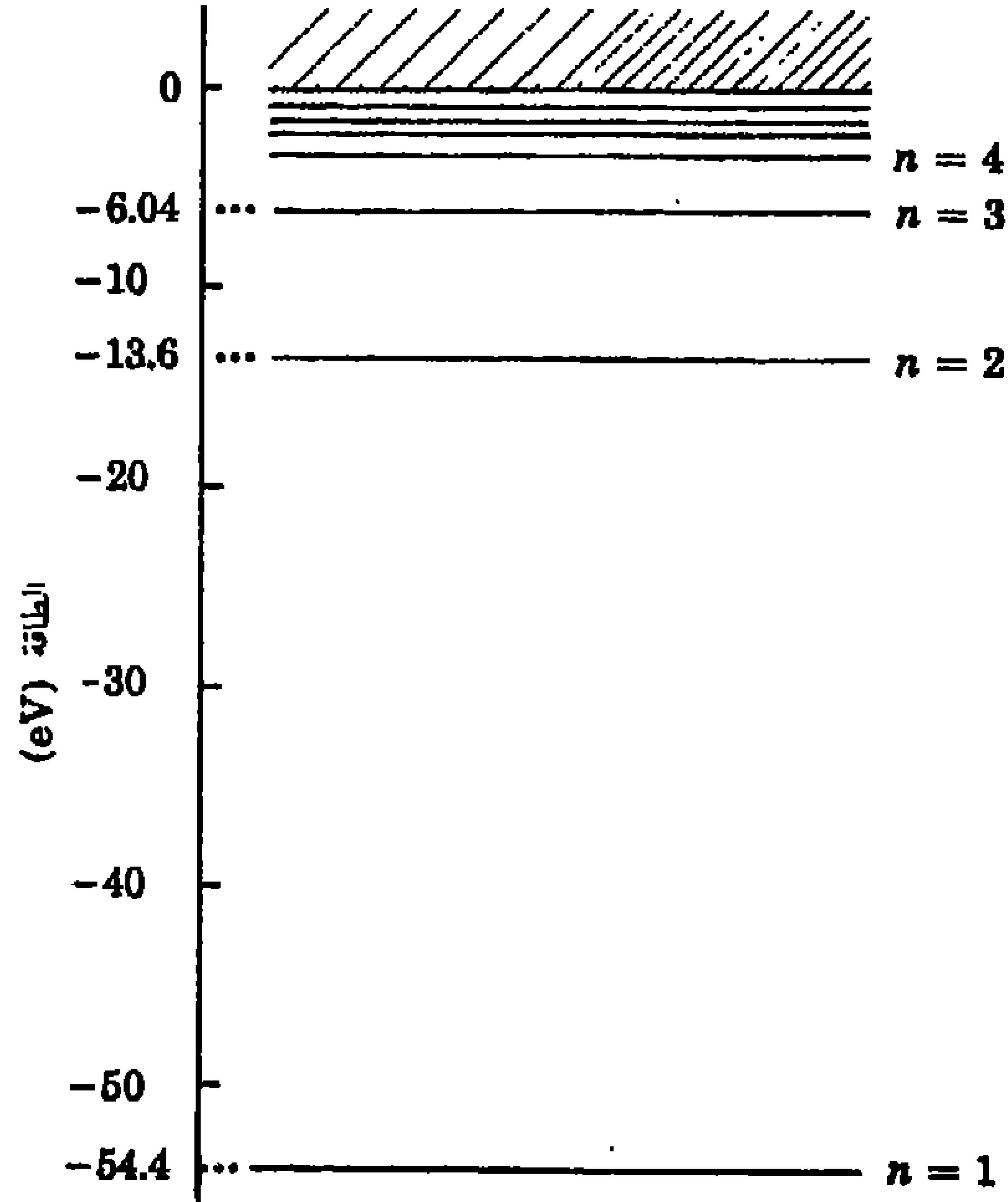
وهذا يقود الى $E_1 = -54.4$ eV، $E_2 = -13.6$ eV، $E_3 = -6.04$ eV الخ .
ويوضح الشكل ٢٧ - ١٠ الرسم البيانى لهذه القيم .

مثال توضيحى ٢٧ - ٢ أوجد الطول الموجى لأول خط من المتسلسلة التى تكافىء متسلسلة ليمان فى هيليوم وحيد التأين .

طريقة الحل تناظر متسلسلة ليمان هبوط الكترون من المستويات العالية الى المستوى $n = 1$ وفى الحالة الراهنة نهتم بالخط الأول لهذه المتسلسلة أى أننا نحتاج الى الانتقال من $n = 2$ الى $n = 1$. من المثال السابق (أو من الشكل ٢٧ - ١٠) نعرف أن $E_1 = -54.4$ eV وأن $E_2 = -13.6$ eV ولذا تكون طاقة الفوتون المبتعث هى

$408\ ev = 54.4\text{-}13.6$ وهذا المقدار يكافىء 65×10^{-19} J . ولما كانت طاقة الفوتون هى $h\nu$ أو $h(c/\lambda)$ فان ،

$$\lambda \approx \frac{hc}{65 \times 10^{-19}\,\text{J}} = 30.0\ \text{nm}$$



شكل (٢٧ - ١٠)
الرسم البيانى لمستويات الطاقة لهليوم وحيد التأين .

وقد كان من الممكن اجراء هذه الحسابات بطريقة أسهل لو أننا عرفنا أن 1 eV تناظر 1240 nm = λ وحيث أن λ تتغير عكسيا مع الطاقة لذا فالطول الموجى يمكن ايجادة من علاقة التناسب الآتية :

$$\frac{\lambda}{1240\ \text{nm}} = \frac{1\ \text{eV}}{40.8\ \text{eV}}$$

ومنها

$$\lambda \approx 30.0\ \text{nm}$$

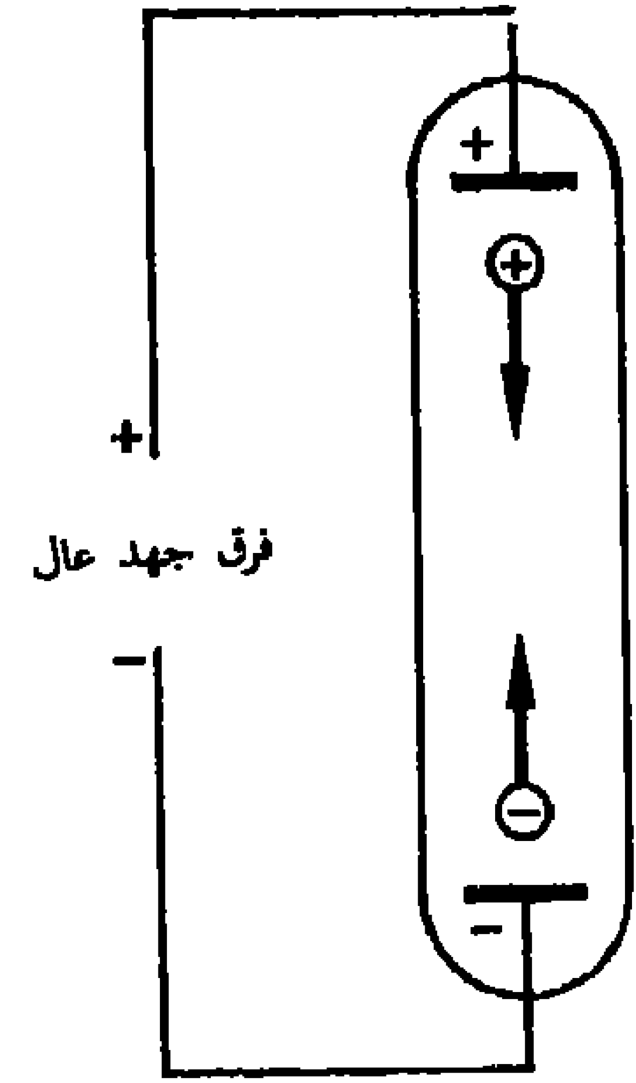
وقد ثبت من هذا التحويل أن ، 1 eV يناظر 1240 nm ملائما فى حسابات من هذا القبيل .

٢٧ - ٦ امتصاص ذرة بوهر للضوء

لا تصدر ذرات الأيدروجين غير المثارة أى ضوء وذلك لأن الألكترون يكون فى أدنى مستوى للطاقة فى المدار 1 ، أى أن الذرة فى الحالة

الأرضية . وكما أشرنا سابقا تبعث الذرة ضوءا فقط اذا استثيرت بشكل ما الى واحد من مستويات الطاقة العليا لها وعندئذ يستطيع الالكترون أن يهبط عائدا نحو النواة فينبعث الضوء خلال هذه العملية .

هناك العديد من الطرق التى يمكن بها استثارة الالكترونات الى مستويات أعلى للطاقة . فعند درجات الحرارة المرتفعة يكون لدى الذرات ط.ح من الكبر بحيث أنها عندما تتصادم مع بعضها البعض تستثار الالكترونات الى مستويات الطاقة الأعلى لها . والغازات الساخنة جدا تقوم باصدار الضوء لأن ذراتها تكون مستثارة بهذه الطريقة .



شكل (٢٧ - ١١)
يقوم فرق الجهد المرتفع عبر الأنبوبة بتعجيل الالكترونات والأيونات ولو كان فرق الجهد كبيرا بدرجة كافية فان الشحنات المتحركة ستؤين ذرات أخرى بالتصادم معها .

ومن ناحية أخرى لو أن ذرات غاز ما وضعت فى أنبوبة تفريغ فان الالكترونات يمكن أن تستثار الى المستويات الأعلى عن طريق التصادم مع الأيونات السريعة أو الالكترونات الأخرى . والجهد المرتفع بين القطبين المبينين فى الشكل ٢٧ - ١١ يقوم بتعجيل عدد صغير من الأيونات والالكترونات الحرة التى تكونت من الذرات المتعادلة نتيجة قذفها بالأشعة الكونية المتناثرة أو الأشعاع النووى التى تنفذ خلال الزجاج . ولو كان فرق الجهد مرتفع بشكل كاف فان الشحنات المعجلةستصطدممع ذرات أخرى وتؤينها ، أى تنتزع منها الكترونات وتحررها . وسرعان ما يتكون عدد هائل من الجسيمات المشحونة ذات السرعات العالية ويحدث التفريغ الكهربائى، وعندما تتحد الالكترونات بالأيونات فان ضوءا ينطلق . وهناك مستويات أخرى للاستثارة تحدث مثل التأين . وهذه أيضا تطلق ضوءا حينما تهبط الالكترونات الى مستويات أدنى للطاقة . وانبعاث الضوء بواسطة الذرات فى أنبوبة تفريغ غازية هو مصدر للضوء فى لافتات النيون والنبيطات المماثلة .

تستثار الذرات أيضا حين يسطع عليها ضوء قوى . فشعاع الضوء يمكن النظر اليه باعتباره مكونا من فوتونات طاقتها $h\nu$ ، ولو اصطدم أحد الفوتونات مع ذرة ما فقد يمنح طاقة للالكترون ويستثيره الى مدار أعلى ، وباستثناء بعض الحالات النادرة، مثل ظاهرة كومتون، فان الفوتون يجب أن يفقد أما كل طاقته أو لا يفقد شيئا على الاطلاق ، ومن ثم فان الفوتون سيعطى كل طاقته الى الالكترون فى ذرة ما فقط عندما تكون طاقة الفوتون $h\nu$ مساوية تماما للفرق فى الطاقة بين المستوى الأصلى ومستوى آخر أعلى .

ولهذا تستثار ذرات الأيدروجين (وكذا الغازات الأخرى) بأطوال موجية محددة من الضوء . ولما كانت معظم الالكترونات فى أدنى مستويات الطاقة وهى الحالة الأرضية بالنسبة للذرة فان الالكترون سيكتسب - على الأقل طاقة مقدارها $E_2 - E_1$ عندما تستثار . وهذا القدر بالضبط من الطاقة هو اللازم لرفع الالكترونات من المستوى 1

الى المستوى 2 (أنظر الشكل ٢٧ – ٩) أما طاقات الفوتون الأقل من هذه فلن تكفى لرفع الالكترون الى المستوى 2 ومن ثم لا يمكن أن تمتص .

ولو كانت طاقة الفوتون أكبر قليلا من $E_2 - E_1$ فان الفوتون أيضا لا يمتص لأن الالكترون وقتها سيرتفع الى مستوى لا وجود له للطاقة ، أى الى مستوى غير تلك التى وجد بوهر أنها مسموح بها . وطاقة الفوتون التالية فى الارتفاع لهذه والقادرة على استثارة الذرة هى $E_3 - E_1$ ، ومثل هذا الفوتون يستطيع رفع الالكترون الى المستوى 3 . وبالمثل تستطيع طاقات الفوتونات $E_4 - E_1$ ، $E_5 - E_1$ ، وهكذا ، أن تستثير الالكترونات ، وهذه الفوتونات (أو ما يكافئها من الأطوال الموجية للضوء) ستمتص بشدة من قبل ذرات الأيدروجين ولن تمتص فوتونات غيرها .

أما الفوتون الذى طلقتة $E_\infty - E_1$ فسينتزع الإلكترون تماما من الذرة ويطلقة أى أن هذا الطول الموجى للأشعاع سيؤين الذرة . ويسمى هذا الفرق فى الطاقة **طاقة التأين** للذرة . ويجب أن تكون طاقة الفوتونات أو الالكترونات أو أية جسيمات أخرى مقذوفة نحو الذرة بحيث تساوى $E_\infty - E_1$ أو أكبر حتى تؤين الذرة . نلاحظ من الشكل ٢٧ – ٩ أن هذه الطاقة تبلغ 13.6 eV للأيدروجين . اذا تلقت الذرة قدرا من الطاقة أكبر من هذا فان الالكترون يصير حرا وستكون له طاقة اضافية أيضا . وتظهر هذه الطاقة على شكل ط.ح. للالكترون المحرر . وهذه الطاقة ليست مكماه ولذا تمثل بالتسلسل المتصل لقيم $E > 0$ فى الشكل ٢٧ – ٩ .

هناك علاقة دقيقة بين الأطوال الموجية للضوء الذى تمتصة ذرة ما وتلك التى تبتعثها . فذرات الأيدروجين غير المستثارة مثلا ، لا يمكنها امتصاص فوتونات طاقتها أقل من $E_2 - E_1$ مع أن فوتونا له هذه الطاقة بالضبط سيمتص بشدة لأنه صحيح تماما لكى يرفع الالكترون الى المستوى 2 . وفى الحقيقة يؤدى هذا الانتقال الى خط له أطول طول موجى فى متسلسلة ليمان كما رأينا من قبل . ومن الواضح أن الطول الموجى لأول خط فى متسلسلة ليمان لا يبتعث فحسب من ذرة مستثارة ولكنه قد يمتص بواسطة ذرة غير مستثارة . وبالمثل فان كل الأطوال الموجية الأخرى التى بينا أنها ستمتص بشدة هى أيضا أعضاء فى متسلسلة ليمان . وكما قد يتوقع من هذه المناقشة فان الذرات المستثارة تبتعث أطوالا موجية من الضوء الذى يمتص بشدة من قبل الذرات غير المستثارة .

مثال توضيحى ٢٧ – ٣ ما هو أطول طول موجى للضوء قادر على تأيين ذرة ايدروجين ؟

طريقة الحل يجب أن تكون طاقة الطول الموجى المطلوب كافية لانتزاع الالكترون من الذرة وتحريره أى لرفع الالكترون الى مستوى الطاقة $n \to \infty$. ونفس هذه الطاقة

تبعث حينما يهبط الالكترون من المدار ∞ الى المدار 1 . من الواضح ان الطول الموجي سيعطى بالمعادلة (٢٧ - ٩) بوضع $p=1$ و $n=\infty$ والثابت $R = 1.097 \times 10^5\ cm^{-1}$

$$\frac{1}{\lambda} = (1.097 \times 10^7)\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{\infty}\right) m^{-1}$$

أو

$$\lambda = 0.912 \times 10^{-7}\ m = 91.2\ nm$$

وهذا بالطبع هو أيضا حد المتسلسلة ، لمتسلسلة ليمان.

وقد كان ممكنا الحصول على هذه الاجابة بطريقة أسرع لو أننا لاحظنا أن $E_\infty - E_1 = 13.6 eV$ وذلك من الشكل ٢٧ - ٩ أو من المعادلة (٢٧ - ١١) ، ثم باستخدام التناسب المذكور فى المثال التوضيحى ٢٧ - ٢ نجد أن ،

$$\frac{\lambda}{1240\ nm} = \frac{1\ eV}{13.6\ eV}$$

ومنها نجد أن $\lambda = 91.2\ nm$

٢٧ - ٧ تفسير دى برولى لمدارات بوهر

لقد نجحت نظرية بوهر لذرة الأيدروجين نجاحا كبيرا - كما رأينا - فى قدرتها على وصف سلوك الذرة ، وحيث أن الهليوم وحيد التأين والليثيوم ($Z=3$) ثنائى التأين كانت فضلا عن ذلك متوافقة مع نموذج بوهر فلا عجب أن نجدها هى الأخرى على صلة قوية بالتنبوءات التى وصلت اليها النظرية ، بالاضافة الى ذلك سنرى أن نموذج بوهر يفيد فى تنسيق الملاحظات الخاصة بذرات أكثر تعقيدا . وعلى الرغم من هذا النجاح فان نموذج بوهر ظل يعانى من نقص خطير فى كثير من النواحى ، وأحدى نقط الضعف الخطيرة تتعلق بفرض بوهر الخاص بالمدارات . ولنحاول الآن أن نرى كيف يؤدى مفهوم دى برولى عن الطبيعة الموجية للجسيمات الى صورة أكثر اقناعا للذرة .

نذكر أن جسيما كتلتة m وسرعتة v يتميز بطول موجى حسب دى برولى $\lambda = h/mv$. ولقد بدا لدى برولى أن ظاهرة التكمية المحيرة والتى اكتشفها بلانك وتلاه بوهر لها مثيل من خبرتنا الشائعة . ففى حالة اهتزاز الأوتار والانابيب الخ ، تكون الاهتزازات مكماه بمعنى أن الرنين يحدث عند ترددات خاصة فقط . وهذه

مدارات بوهر بإعتبارها رنين الالكترون – موجة

الترددات هي دائما تلك التي تكون فيها الموجات المعنية «مناسبة» تماما للوتر أو داخل الأنبوبة أو أى شيىء آخر وبهذه الحقيقة فى ذهنه فكر دى بروليى فى مدارات بوهر كما لو كانت مسارات رنين لموجات الالكترون .

لكى ترن موجة ما على مسار دائرى فان هذا المسار يجب أن يكون طوله مساويا لطول موجى واحد بالضبط أو طولان موجيان أو ثلاثة الخ . وفى تلك الحالات فقط ستظهر قمم الموجة عند نفس الأماكن على المسار بحيث يتم الرنين حين تكون قمة فوق قمة وقاع فوق قاع كما هو ممثل فى الشكل ٢٧ – ١٢ حيث كان المسار مساويا فى الطول لأربعة أطوال موجية . وبشكل عام فانه لو كان طول المسار مساويا عدد n طول موجى فانه ،

$$2\pi r_n = n\lambda$$

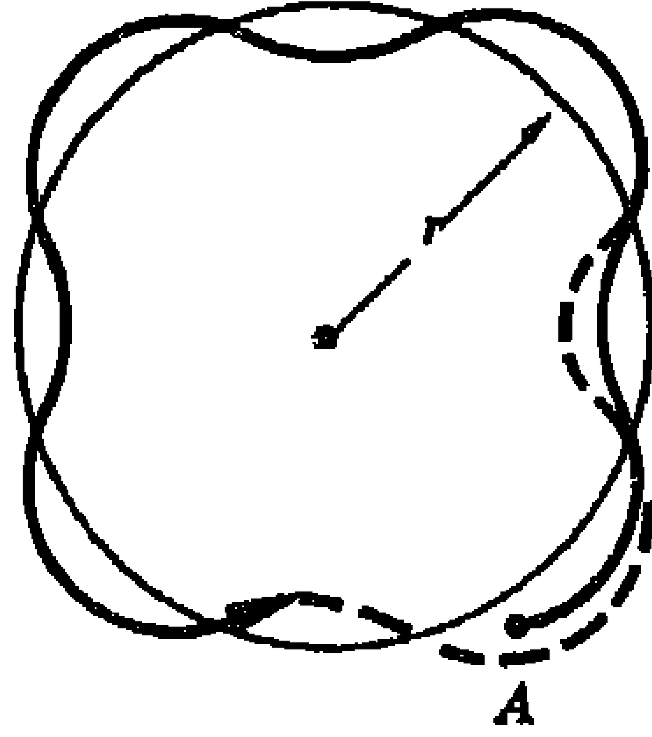
أوحيث أن $\lambda = h/mv$

$$2\pi r_n = n\frac{h}{mv}$$

ولكن هذا يمكن كتابته كما يلى ،

$$mvr_n = n\frac{h}{2\pi}$$

وهذا بالضبط هو فرض بوهر فى المعادلة (٢٧ – ٧)



شكل (٢٧ – ١٢)
لو كان طول المدار $2\pi r$ عبارة عن عدد صحيح من الأطوال الموجية فان الموجة سوف تقوى نفسها كلما عادت الى نقطة البداية A . وفى الحالة الموضحة $2\pi r = 4\lambda$

من هنا نجد أذن أن مدارات بوهر يمكن اعتبارها رنين الموجات الالكترونية وهى تحيط بالنواة . وبهذه الطريقة لا يمكن للمدارات أن تكون نتيجة افتراض لغرض معين ولكن يمكن تتبع أصلها الى حقيقة أساسية وهى أن الجسيمات لها خواص موجية . وعلى الرغم من أن نظرية بوهر قد صارت أكثر معقولية نتيجة للتفسير الأخير للمدارات الا أننا سنرى فى القسم التالى أن نظرية بوهر قد صارت مفرطة فى التبسيط بشكل فادح .

٢٧ – ٨ رنين الموجات فى الذرات

قبل أن نسترسل فى مناقشة دور موجات دى برولى فى ذرة ما لنفحص أولا معنى موجة دى برولى نفسها . فلعدة سنوات كان هناك قدر كبير من الجدل حول حقيقة ما تخبرنا به الخواص الموجية للجسيمات وقد اصبح من المقبول بشكل عام أن موجات دى برولى مرتبطة بالجسيمات المادية ارتباط الأمواج الكهرمغناطيسية بالفوتونات .

فعندما يرسل شعاع من الضوء مثلا ، الى شقين ، تلاحظ نمط التداخل على ساتر وراء الشقين وفى الواقع يلاحظ هذه الظاهرة لجميع أنواع الموجات كما رأينا . ولقد كانت قناعتنا فى الفصول الماضية محصورة فى حساب مواقع النهايات العظمى والنهايات الدنيا فى نمط التداخل ولكن الفوتونات تسقط فى جميع المواقع التى يلحظ فيها ضوء ، فعدد الفوتونات الساقطة على نقطة معينة يتناسب طرديا مع شدة الضوء فى تلك النقطة . ومن ثم يمكن اعتبار نمط شدة الاضاءة على أنه رسم بيانى يوضح نسبة الفوتونات فى الشعاع القادم الذى يسقط على الساتر فى مواقع مختلفة .

لكى نحسب شدة الاضاءة لنمط متكامل فان علينا أن نحل مسألة رياضية معقدة باستخدام المعادلة الموجية . ويؤدى حل هذه المعادلة الى ايجاد كمية يطلق عليها **الدالة الموجية** وهى تمثل بالرمز ψ (وهو حرف أغريقى ينطق « بساى ») وهى كمية تعطى حين تربع شدة الضوء التى يجب أن نجدها عند أية نقطة فى الفضاء ولكن حيث أن شدة الضوء تتناسب مع عدد الفوتونات ، فان الدالة الموجية تخبرنا أيضا عن كم من الفوتونات سيوجد عند كل نقطة فى الفضاء . تلخيصا للموقف ، فان حل المعادلة الموجية لموجات الضوء المارة خلال شق مزدوج أو نبيطة مشابهة ، يؤدى الى ايجاد الدالة الموجية ψ للموجات الضوئية . وهذه الدالة الموجية تعطى شدة الاضاءة فى كل نقطة من نقط نمط التداخل وهذه بدروها تخبرنا عن عدد الفوتونات الموجوذة فى كل جزء من النمط .

وينطبق موقف مشابه على موجات دى برولى فالمعادلة التى تحكم سلوكها هى معادلة شرود نجر التى ذكرت بالفعل فى القسم ٢٦ — ٧ . ويمكن حل معادلة شرودنجر مثلما حدث للمعادلة الموجية ، فنصل الى الدالة الموجية ψ ، التى حين تربع تعطى شدة موجات دى برولى وكما سبق تخبرنا الشدة عن توزيع الجسيمات فى الفضاء . وفى حين أن شدة الضوء ودالته الموجية تصف حركة الفوتونات ، فان الدالة الموجية لمعادلة شرود نجر تصف حركة الالكترونات (أو جسيمات أخرى)

ولكى ندرك ما معنى هذا فى موقف فعلى علينا أن نعتبر ذرة الايدروجين . وعلى أحسن الوجوه يمكن لنظرية بوهر أن تخبرنا فقط عن موقع النهايات العظمى فى نمط التداخل . وكما فى حالة الشق المزدوج أو أية تجربة تداخل أخرى لا يشكل هذا الا جزءا صغيرا من الموضوع ، لأن الفوتونات (للضوء) أو الالكترونات (لموجات دى برولى) تتواجد فى أماكن أخرى أيضا . وحين تحل معادلة شرود نجر لذرة الأيدروجين (وهذا ليس عملا روتينيا بسيطا) فان شدة النمط ستكون معتمدة

على مجرد كيفية رنين موجة الالكترون بداخل الذرة.ولوصف هذا الرنين يجب أن تستفيد من مجموعة من الأرقام الصحيحة تسمى الأعداد الكمية .

يتطابق العدد المسمى بالعدد الكمى الرئيسى n مع العدد n الذى استخدم فى نظرية بوهر ، وهو يدلنا على طاقة الذرة ، ففى كل من نظرية بوهر والنظرية الموجية للذرة تعطى الطاقة بالمعادلة ،

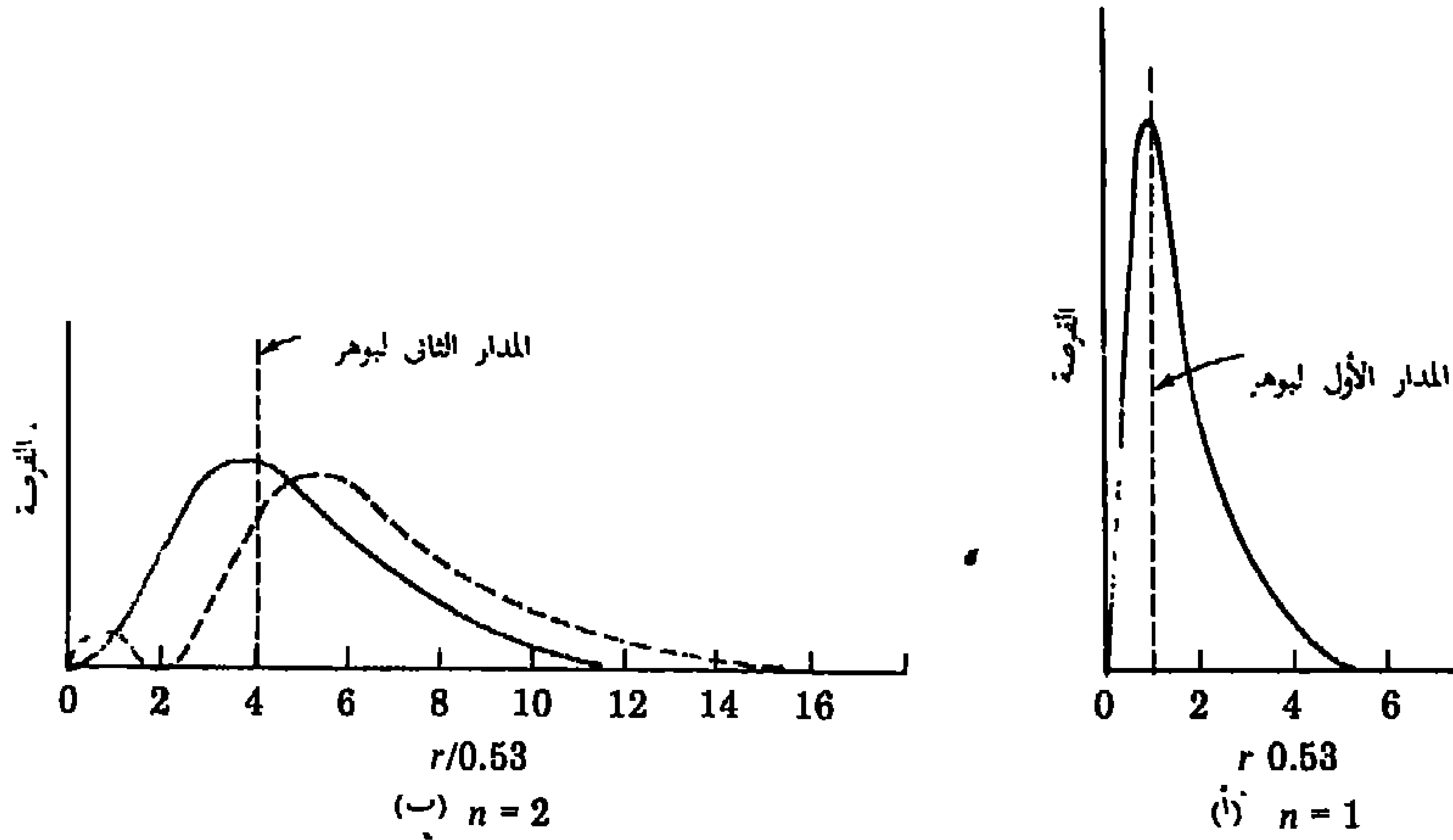
$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2} \quad \text{eV}$$

شكل ٢٧ - ١٣

(أ) تتنبأ النظرية الموجية بالإحتمالات المبينة والدالة على وجود الإلكترون عند أنصاف أقطار مستعدة (تقاس r بالأنجستروم)

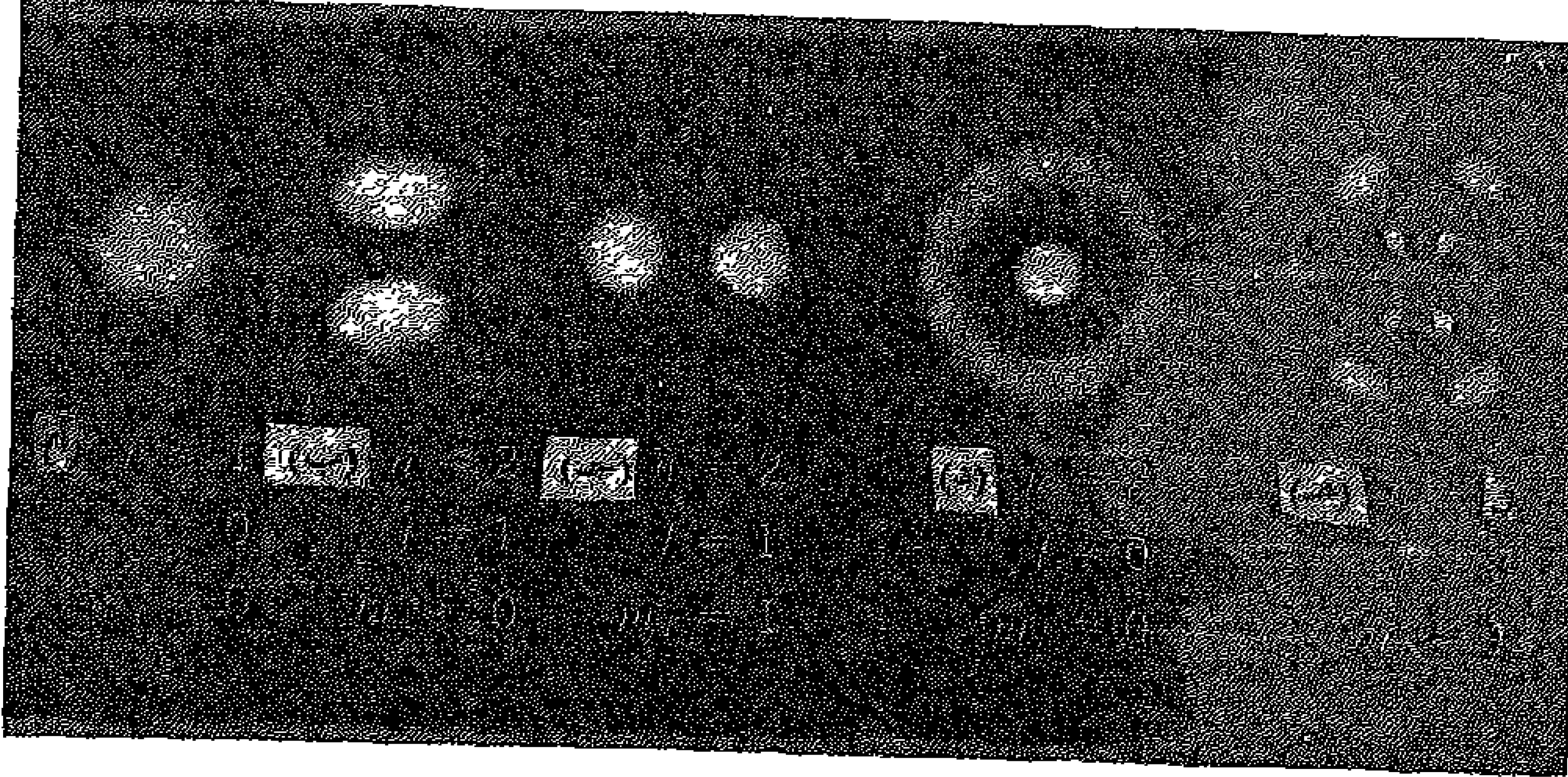
(ب) منحنيان مختلفان للرنين للعدد $n = 2$.

لقد أفترض بوهر أنه عندما $n = 1$ فان الالكترون يكون فى أول مدار له وهو دائرة . على أن الحل الموجى يعطينا نمط الشدة بأكملة ويخبرنا بأن من المحتمل أن نجد الالكترون فى أماكن عديدة مختلفة ولكن أكبر الاحتمالات أن يوجد فى تلك المناطق حيث تكون ψ، الدالة الموجية كبيرة . وهذا النمط للشدة المناظر للحالة $n = 1$ لذرة الايدروجين موضح فى الشكل ٢٧ - ١٣ أ حيث بينا الفرصة (أو الاحتمال) أن يوجد الالكترون عند انصاف أقطار معينة من النواة . تنص نظرية بوهر ، بالطبع على أن الالكترون سيوجد فقط عند نصف قطر مدار بوهر الأول وهو 0.53 °A .



وكما هو متوقع ، بينت النظرية الموجية أن نصف قطر مدار بوهر هو المسافة التى يكبر احتمال وجود الالكترون عندها . وهى كذلك موقع النهاية العظمى فى نمط الشدة . على أن الالكترون يمكن أن يوجد كذلك فى مواقع أخرى كثيرة فى الذرة . (تذكر أنه فى نمط التداخل الضوئى يمكن أن تتواجد الفوتونات فى أماكن أخرى غير مناطق النهايات العظمى) وهكذا نجد أن صورة بوهر للإلكترون وهو

يدور حول النواة فى مدار ليست بالصورة الواقعية وفى الحقيقة فان نمط الشدة الذى أوجد من النظرية الموجية ليس حتى على شكل حلقة حول النواة وبدلا من هذا يكون كره متمركزة حول النواة . وهناك محاولة فى الشكل ٢٧ – ١٤ أ لتوضيح هذا. للحصول على صورة ثلاثية الأبعاد للموقف الفيزيائى فان النمط يجب ادارته حول محور رأسى يمر بالمركز ، وتعطى شدة النمط فى الفضاء الفرصة لوجود الالكترون هناك .



شكل (٢٧ – ١٤) للحصول على توزيع الالكترون فى الفضاء يجب إدارة الأشكال الموضحة حول محور رأسى وكل التوزيعات تكون ثابتة على أية دائرة يكون المحور مركزها .

لنستمر الآن فى اعتبار نمط الرنين فى الذرة عندما $n = 2$ ولعلك تذكر أن نظرية بوهر تتنبأ للالكترون بنصف قطر مقدار 4×0.53 A فى هذه الحالة ، فى حين أن النظرية الموجية تتنبأ بما هو مبين فى الشكل ٢٧ –١٣ ب بالخط المتصل . لاحظ أن – الالكترون يكون وجوده أكثر احتمالا عند نصف قطر بوهر – كما سبق . ولكنه يستطيع أن يتواجد أيضا فى موقع آخر ، وهذا ليس بمستبعد على أنه كما فى الحالة $n = 1$ لا يكون النمط الحقيقى للشدة فى الفضاء على شكل مدار دائرى وبدلا من هذا يتكون من دمبل (كرتان بينهما قضيب) كما فى الشكل ٢٧ – ١٤ (ب) . تذكر أن الرسم البيانى فى الفضاء ينتج بادارة الشكل حول محور رأسى . وكما ترى ينحصر وجود الالكترون فى نتوءين مستديرين على المحور .

على أن هذه ليست هى الطريقة الوحيدة التى يمكن لموجة دى برولى للالكترون أن ترن بها فى حالة الطاقة عند $n = 2$ فهناك شكلان آخران للرنين يمكن الحصول عليهما ، وتنتمى الأشكال الثلاثة الى نفس المجموعة لأن العدد الكمى الرئيسى لهم جميعا هو n وبذا تكون طاقاتهم متساوية . ويوضح الشكلان ٢٧ – ١٤ (حـ) و (د) ، أنماط الشدة لهذين الرنينين الآخرين اللذين يعطيان معا توزيعات الالكترون الموضحة بالخط المتقطع فى الشكل ٢٧ – ١٣ (ب) .

حين ننتقل الى $n = 3$ فاننا مرة أخرى نجابه بعدة رنينات ممكنة لهذه الطاقة ، فكما رأينا ، عند $n = 1$ كان هناك شكل واحد للرنين ، وعند $n = 2$ كانت هناك

ثلاثة أشكال للرنين . أما عند $n=3$ فاننا نجد ستة أنماط مختلفة للرنين وبعضها يصبح معقدا جدا ، ويبين الشكل ٢٧ – ١٤ (هـ) أحد النماذج

من كل ما سبق نرى أن نظرية بوهر تعتبر تبسيطا مفرطا بفداحة لسلوك الالكترون فى ذرة الأيدروجين . ومفهوم بوهر عن المدارات الثابتة – على وجه الخصوص – يتعذر الدفاع عنه . على أن مستويات الطاقة فى الذرة قد تنبأت بها النظرية بشكل صحيح . وكان للعدد الكمى الرئيسى n الذى قدمه بوهر أهمية عظيمة . وعلى الرغم من وجوب الاحتفاظ بتحفظاتنا تجاه نموذج بوهر فى الأذهان الا أن النظرية تعتبر اطارا للوصف المنتظم للذرات وكثيرا ما سنشير اليها .

مثال توضيحى ٢٧ – ٤ قدر قيمة عدم التحديد فى موضع الكترون فى ذرة ايدروجين حينما يكون فى حالة الطاقة $n=1$.

طريقة الحل لعمل هذا سنستعمل الصورة التالية لمبدأ عدم التحديد .

$$\Delta p\, \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

ونعلم أن طاقة الجسيم فى الحالة $n=1$ هى $-13.6\,\text{eV}$ ، أو حوالى -2.2×10^{-18} j وفضلا عن ذلك ،

$$\frac{p^2}{2m} = \tfrac{1}{2}mv^2 = \text{ط.ح}$$

ولكننا وجدنا عند اشتقاق المعادلة (٢٧ – ٥) أن ط.ح. لالكترون بوهر مساوية عدديا للطاقة الاجمالية للذرة . ومن ثم 2.2×10^{-18}j = ط.ح وبمساواة هذه الكمية مع $p^2/2m$ وحل المعادلة لايجاد p. ، نجد أن ،

$$p = \sqrt{(2)(9\times 10^{-31})(2.2\times 10^{-18})} = 2.0\times 10^{-24}\ \text{kg}\cdot\text{m}$$

لو أننا جعلنا أقصى قيمة لعدم التحديد فى كمية التحرك Δp فاننا نحصل على أدنى قيمة ممكنة للمقدار Δx ولنضع اذن Δp مساوية للمقدار p نفسه وعليه فاننا نجد من علاقات عدم التحديد .

$$\Delta x \geq 0.53\times 10^{-10}\ \text{m} = 0.53\ \text{Å}$$

حيث أن نصف قطر الذرة حوالى 5°A فاننا نجد أنه لا توجد امكانية مطلقا لتعيين موضع الالكترون فى الذرة بدقة . وتعكس النظرية الموجية هذه الحقيقة بالدلالة على أن الالكترون يمكن أن يوجد خلال الذرة .

٢٧ - ٩ الاعداد الكمية ومبدا باولى للاستبعاد

لقد وجدنا فيما سبق أن ذرة الأيدروجين والكترونها يمكن أن تتواجد فى مستويات محددة للطاقة يميزها عدد صحيح هو n. ، ووجدنا على وجه الخصوص أن مستويات الطاقة تعطى بالمعادلة ،

$$E_n = \frac{-13.6Z^2}{n^2} \quad \text{eV}$$

يتراوح العدد الصحيح n من 1 الى ∞ عندما تتخذ الذرة طاقات مسموح بها متعددة . وعلى الرغم من وصولنا لهذه النتيجة باستخدام نموذج بوهر ، الا أن الصورة الموجية المبينة على معادلة شرود نجر تقودنا أيضا الى نفس هذه النتيجة . ومن ثم نجد أن n يعتبر بارامتر (معاملا) أساسيا يلزم لوصف حالة ذرة الأيدروجين ، كما ذكرنا من قبل يسمى العدد الكمى الرئيسى . لاحظ أنه يميز مستوى الطاقة الذى يوجد فيه الالكترون . لقد صور بوهر كل قيمة من قيم n على أنها مصاحبة لمدار خاص من مدارات الالكترون ولكن هذا قد ثبت - كما أشرنا فى القسم السابق - أنه أمر يصعب الدفاع عنه . وعلى الرغم من هذا فمن شائع الاستعمال أن يقال أن كل قيمة من قيم n تناظر قشرة خاصة (بدلا من مدار خاص) تحيط بالنواة ، فحين تكون الذرة فى مستوى الطاقة $n = 3$ مثلا ، فمن المعتاد أن يقال أن الالكترون فى القشرة $n = 3$.

قشرات الذرة

لقد وجدنا فى القسم السابق أيضا أن هناك أكثر من شكل ممكن لرنين الموجة عند نفس الطاقة أى عند نفس قيمة العدد الكمى الرئيسى n . وتبين النظرية الموجية أن هناك عددان كميان آخران يجب تحديدهما حتى نتمكن من تسمية رنين موجى معين داخل الذرة . وأحد هذه الاعداد وهو **العدد الكمى المدارى** يرتبط بكمية التحرك الزاوى لالكترون بوهر فى مداره الرنينى ويرمز لهذا العدد بالرمز l ويتخذ قيما صحيحة من الصفر حتى (n-1) . فتنحصر قيم l الممكنة بقيمة واحدة عندما تكون $n = 1$ ، على سبيل المثال ، وهى $l = 0$. عندما $n = 2$ يصبح من الواضح أن l يمكن أن تأخذ القيم 0و 1 لأن $n\text{-}1 = 1$ فى هذه الحالة .

العدد الكمى المدارى

أما العد الكمى الثالث وهى المسمى **العدد الكمى المغناطيسى** فيمكنه أن يتخذ مثلا $0, \pm1, \pm2, \ldots, \pm l$، ويتمثل بالرمز m_l ، عندما تكون $n = 4$ و ، مثلا ، فإن أكبر القيم الممكنة للعدد l هى 3 ومن ثم تأخذ m_l القيم -3,-2,-1,0,1,2,3, ويعنى ذلك أن هناك سبعة أشكال مختلفة للرنين عندما تكون $n = 4$ و $l = 3$ وبالاضافة إلى ذلك هناك خمسة أشكال للرنين عندما $l = 2$ وثلاثة عندما $l = 1$ وشكل واحد عندما $l = 0$ ومن ثم فالذرة يمكن أن تتواجد فى $16 = 1 + 3 + 5 + 7$ رنينا مختلفا لكل منها نفس الطاقة وهى طاقة المستوى $n = 4$

العدد الكمى المغناطيسى

العدد الكمى للتدويم (الدرور)

فى الختام هناك شرط كمى للالكترون نفسه ، فكما نوهنا فيما سبق يتصرف الالكترون كمغناطيس صغير بسبب تدويمه حول محور يخترق مركزه . وهذا المغناطيس يمكنه أن يتخذ وضعين فقط بالنسبة لمجال مغناطيسى خارجى قد تجد الذرة نفسها موضوعة فيه . فهو قد يصطف موازيا أو موازيا ومضادا لاتجاه خط المجال . ونميز هذا الأمر بتسمية **العدد الكمى للتدويم** ويرمز له بالرمز $m_s = \pm\frac{1}{2}$ ، وتمثل الاشارتان الموضع الموازى والموازى المضاد .

لقد وجدنا أذن أنه يلزم أربعة أعداد كمية لوصف حالة الكترون فى ذرة ما ،

الرئيسى : $n = 1, 2, \ldots$

المدارى : $l = 0, 1, \ldots, n-1$

المغناطيسى : $m_l = 0, \pm 1, \ldots, \pm l$

التدويم : $m_s = \pm\frac{1}{2}$

هناك لكل مجموعة معينه من قيم n, l, m_l نمط رنين موجى محدد جدا لموجة الالكترون داخل الذرة . ولتحديد هوية الكترون ما بشكل تام فاننا يجب أن نعرف ما اذا كان تدويم الالكترون متجها مع ($m_s = \frac{1}{2}$) أو ضد ($m_s = -\frac{1}{2}$) المجال المغناطيسى . ونطلق على كل مجموعة من الأعداد الكمية n, l, m_l, m_s **حالة** الكترونية للذرة وسنرى الآن أن هناك قانونا طبيعيا غاية فى الأهمية ينطبق على سلوك الالكترون فى الحالات المتاحة .

وقد استطاع باولى تقدير أهمية تعيين هذه الحالات – كما فعلنا – بشكل تام عام ١٩٢٥ لأول مرة ، ويمكن لاكتشافه أن يلخص ببساطة شديدة وهو يعرف **بمبدأ الاستبعاد لباولى** :

> لا يمكن لالكترونين فى ذرة ما أن يكون لهما نفس الاعداد الكمية الأربعة ، أى لا يمكن لالكترونين أن يتواجد فى نفس الحالة .

وهذا المبدأ أساسى لفهم التركيب الالكترونى للذرات كما سنرى فى القسم القادم .

٢٧ – ١٠ الجدول الدورى

لقد انصب جل اهتمامنا حتى الآن على الذرة ذات الالكترون الواحد فقط ، وهذه قد تكون الأيدروجين أو الهليوم وحيد التأين أوالليثيوم ثنائى التأين وهكذا ، وقد أصبحنا الآن فى وضع يسمح لنا بمناقشة كيفية ترتيب الالكترونات الاضافية فى الذرات عديدة الالكترونات والتى توجد فى الطبيعة ومسجلة فى الجدول الدورى . وللقيام بهذا سنستفيد مرة أخرى من مفهوم القشرات الالكترونية حول النواة ، فكل قيمة من قيم n

تصاحبها قشرة e. علاوة على ذلك ، سنفترض أن نفس عمليات الرنين التى أوجدناها للذرات وحيدة الالكترون يمكن نقلها بصورة كيفية الى ذرات أكثر تعقيدا . ويعنى هذا أننا سنستخدم الحالات الالكترونية التى تحددها الاعداد الكمية $n\ l,\ m_l,\ m_s$ ، التى ناقشناها فى القسم السابق .

والسؤال المطروح الآن هو : كيف ترتب الالكترونات أنفسها فى الحالات الذرية المختلفة عندما يوجد فى الذرة أكثر من الكترون ؟ فهناك ستة الكترونات ، مثلا ، فى كل ذرة كربون ففى أى مستوى للطاقة وفى أية حالة الكترونية يمكن أن نجد هذه الالكترونات ؟ تكمن اجابة هذا السؤال فى الاستعانة بالقواعد الثلاثة ، التى سبقت مناقشتها :

للذرة المتعادلةعدد من الالكترونات مساو لعددها الذرى Z

فى الذرة غير المستثارة تكون الالكترونات فى أدنى حالات الطاقة الممكنة .

لا يمكن أن يكون لالكترونين فى ذرة ما نفس الاعداد الكمية الأربعة (مبدأ الاستعباد) .

لنستعمل الآن هذه القواعد فى تحديد التركيب الالكترونى للذارت غير المستثارة فى الجدول الدورى .

الايدروجين $(Z = 1)$ سيكون الكترونها الوحيد فى المستوى $n = 1$ وهو أدنى مستوى طاقة ممكن ولا يمكن أن يحدث خرق لقاعدة الاستبعاد .

هليوم $(Z = 2)$ يمكن لكل من الكترونيها الاثنين أن يتواجدا فى المستوى $n = 1$ لأنه يمكن أن يكون لهما الاعداد الكمية غير المتشابهة التالية :

الكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	$\frac{1}{2}$
2	1	0	0	$-\frac{1}{2}$

ولكن حيث أن هذه هى الطرق الوحيدة الممكنة لتشكيل الاعداد الكمية للحالة $n = 1$ ، فانه لا يمكن لالكترون ثالث أن يدخل هذه القشرة ، أى أن القشرة قد امتلأت .

ليثيوم $(Z = 3)$ لهذه الذرة ثلاثة الكترونات ولذا لابد أن يذهب الالكترون الثالث الى القشرة $n = 2$ ويكون لدينا ،

الكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	$\frac{1}{2}$
2	1	0	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	0	0	$\frac{1}{2}$

وحيث أن هذا الالكترون الثالث يقع فى مستوى الطاقة الثانى ، لذا يكون من السهل ازالتة من الذرة عن الإلكترونين الآخرين . ومن ثم تفقد ذرة الليثيوم واحدا من الكتروناتها فى التفاعلات الكيميائية وتكون احادية التكافؤ .

من الواضح أن هناك قليل من التشكيلات الممكنة للاعداد الكمية عندما $n = 2$ ولو أنك عددتهم لوجدت أن هناك ثمانية طرق كما يلى :

n	l	m_l	m_s
2	0	0	$\pm\frac{1}{2}$
2	1	0	$\pm\frac{1}{2}$
2	1	+1	$\pm\frac{1}{2}$
2	1	−1	$\pm\frac{1}{2}$

وعلى ذلك يتواجد فى القشرة $n = 2$ ثمانية الكترونات ، ومعنى هذا ان القشرة لن تصير مغلقة إلا حين يصل العدد الذرى للعنصر $Z = 10$ وهو عنصر النيون . وهو كما تعلم غاز خامل وسبب خموله أن له قشرة مغلقة . بالنسبة للعنصر التالى $Z = 11$ وهو الصوديوم وهو أحادى التكافؤ نظرا لأن الالكترون الاضافى يكون بمفردة فى القشرة $n = 3$ ومن السهل الى حد ما ازالته .

كلما تقدمنا الى العناصر ذات القيم العالية للعدد الذرى Z فى الجدول ، كلما صار مفهوم القشرة أقل فائدة . فالمشكلة تظهر أساسا لأن الفواصل بين امستويات الطاقة تصبح صغيرة نسبيا عند القيم العالية للعدد n . وفى تلك الحالات يسهم التنافر بين الالكترونات المختلفة فى الذرة بطاقات من الكبر أحيانا بحيث تلغى تأثير فروق الطاقة بين القشرات ، وعلى الرغم من هذه المضاعفات فان استخدام مفهوم القشرة قد أثبت فائدتة فى الاعتبارات الكيفية .

٢٧ – ١١ انتاج أشعة X

نعلم أن الذرات تبتعث ضوءا أو شعاعا ك.م. آخر حينما يسقط الكترون من مستوى طاقة عال الى آخر أدنى منه . بالنسبة للايدروجين والأيونات وحيدة الالكترون ، تكون الأطياف بسيطة الى حد كبير وذلك لأن مستويات الطاقة بالنسبة لها تعطى بالعلاقة ،

$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2} \quad \text{eV}$$

أما فى الذرات الأخرى فان الالكترونات الداخلية تتأثر بشدة بالنواة القريبة ولذا تنطبق هذه العلاقة بشكل أفضل بالنسبة لهم . وتجدر الملاحظة ، بشكل خاص ، أن شحنة النواة مؤثرة جدا فى تحديد هذه المستويات الداخلية . فى حالة $Z = 100$ ، مثلا ، تكون الطاقات المتضمنة ، أكبر 10,000 مرة عما هى للايدروجين وتبعا لذلك تكون الفوتونات المبتعثة عند هبوط الالكترون من القشرة $n = 2$ الى القشرة $n = 1$ فى عنصر ذى Z كبيرة — ذات طاقات تقع فى نطاق $100,000\ eV$ وهذا يناظر طولا موجيا قدره 1240/100,000 nm أو حوالى 0.012 nm وهو طول موجى يقع فى مدى أشعة x .

وعلى الرغم من أن ذرات العناصر الثقيلة قادرة على ابتعاث أشعة x الا أنها لا تفعل ذلك مالم تستثار بطريقة صحيحة . ففوتون أشعة اكس لا يبتعث مالم يهبط الكترون من قشرة خارجية للذرة الى ثغرة فى قشرة داخلية ، ولما كانت الذرات غير المستثارة لا تملك ثغرات فى تلك القشرات لذا فأشعة x لا تبتعث منها . الذرة ، اذن يجب أن تستثار أولا بحيث يلقى الالكترون الموجود فى القشرة $n = 1$ أو $n = 2$ خارج القشرة مخلفا بذلك ثغرة يمكن لالكترون خارجى أن يهبط فيها ويتم انجاز هذا عادة فى أنبوبة أشعة x كالمبينة فى الشكل (٢٧ — ١٥) (أ) .

أشعة X المميزة

تعجل الالكترونات — كما هو موضح فى الشكل — المبتعثة من الفتيلة الساخنة خلال فرق الجهد يبلغ حوالى 10^5 V . وحين تصطدم هذه الإلكترونات ذات الطاقة العالية بالذرات ذات Z العالية فى الهدف فان الكترونات تقتلع من القشرات الداخلية للذرات . وحين تسقط الكترونات أخرى داخل هذه الثغرات ، تبتعث فوتونات أشعة x .لأشعة x المتولدة بهذه الطريقة أطوالا موجية مميزة لفرق الطاقة بين القشرات المختلفة داخل الذرة . ومعنى هذا أن الفوتونات المبتعثة تحمل طاقة تساوى الفرق فى الطاقة بين القشرتين اللتين تعتبران كنقطة بداية ونقطة نهاية للالكترون الهابط الى الثغرة . وتعرف أشعة X المبتعثة فى العملية باسم أشعة x المميزة .

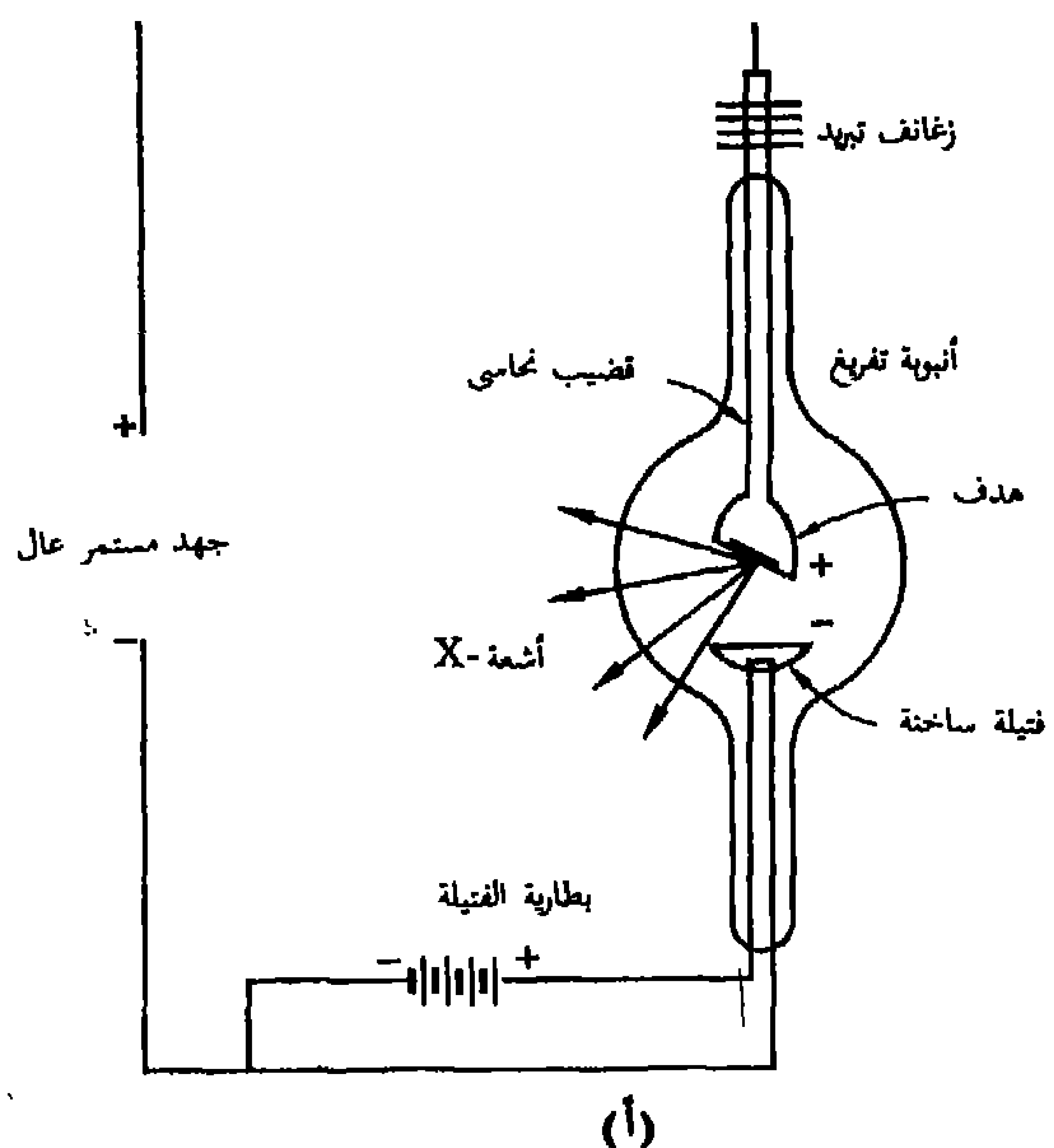
تعريف

تعريف

هناك نوع آخر من أشعة x المبتعثة من هدف حين يقذف بالالكترونات وهذا النوع يعرف باسم **أشعة الفرملة** وهو مشتق من الكلمة الالمانية التى معناها (اشعاع الفرملة) . وكما يتضح من الاسم تبتعث هذه الأشعة من الالكترونات المقذوفة عندما تبطأ حركتها فجأة عند

أشعة الفرملة

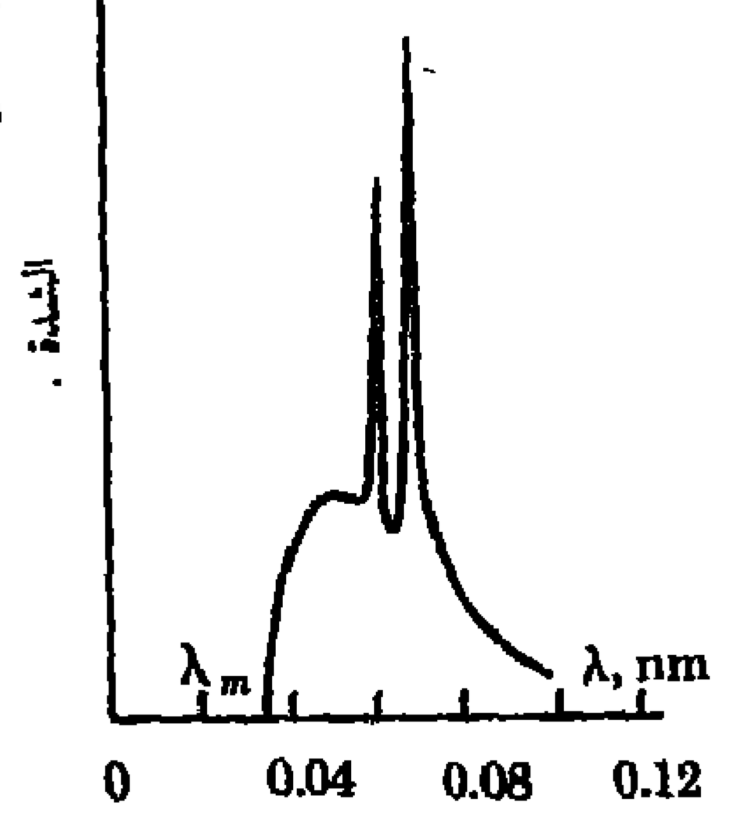
شكل (٢٧ - ١٥)
(أ) تقوم الالكترونات المبتعثة من الفتيلة الساخنة بضرب الهدف فيقوم الهدف بدورة بابتعاث أشعة x (ب) نظام أشعة x للأعمال الروتينية . وقد استخدم هذا النظام للحصول على الصورة الفوتوغرافية المبينة فى صفحة ٩٥
(ب) شركة هيوليت - باكادر



(أ)


(ب)

التصادم مع الهدف . نحن نعلم أن أية شحنة معجلة تقوم باصدار أشعة كهرمغناطيسية (كالشحنات المهتزة على هوائى مثلا) . ومن ثم تقوم هذه الالكترونات المتصادمة أيضا ببث اشعاع حينما تبطأ بشدة فى الهدف . وحيث أن معدل التباطؤ يكون كبيرا فان الاشعاع المبتعث يكون نتيجة لذلك ذا طول موجى قصير وتكون أشعة الفرملة بهذا فى نطاق أشعة x . ولكن أشعة الفرملة – على عكس الأشعة المميزة – تكون ذات مدى متصل من الأطوال الموجية مما يعكس الحقيقة القائلة بأن عملية التباطؤ (التقاصر) يمكن أن تحدث بعدد لا نهائى تقريبا من الطرق المختلفة ، بحيث تتباين الطاقة المحررة بشكل كبير من تصادم لآخر .



شكل (٢٧ – ١٦)
أشعة X المبتعثة من هدف من المولبيدنم عندما يقذف بالكترونات طاقتها 35000 eV

يبين الشكل ٢٧ – ١٦ رسما بيانيا للاشعاع المبتعث من هدف من المولبيدنم حين يقذف بالكترونات طاقتها 35.00 eV . القمتان الحادتان فى الرسم هما أشعة x المميزة التى تبتعث عندما تهبط الالكترونات الى القشرة $n=1$ لهذه الذرة من قشراتها $n=2$ و $n=3$ ويكون أقصر الأطوال الموجية هو بالطبع ما يناظر الانتقال ذى الطاقة الاكبر أى الانتقال من $n=3$ الى $n=1$. تعتبر أشعة الفرملة هى السبب وراء انتشار الاشعاع ذى الشدة المنخفضة على مدى الأطول الموجية الأطوال من λ_m . وحيث أن طاقة الالكترونات فى الشعاع الأصلى كانت 35,000 eV فان الفوتونات المبتعثة لا تستطيع أن تكون طاقاتها أكبر من هذه القيمة . وباستخدام التحويل الذى تعلمناه من أن 1240nm تكافىء طاقة قدرها 1 ev نجد أن 35.000 تناظر (1240 nm) / (35,000 ev) $\approx$ 0.035 nm . وكما نرى من الشكل ٢٧ – ١٦ ، يكون لاشعة الفرملة ذات الطاقة القصوى هذا الطول الموجى بالفعل .

مثال توضيحى ٢٧ – ٥ استخدم البيانات المعطاة فى الشكل ٢٧ – ١٦ لكى توجد فرق الطاقة بين المستويين $n=1$ ، $n=2$ فى المولبيدنم .

طريقة الحل لقد وجدنا فى مناقشة الشكل ٢٧ – ١٦ أن قمة الطول الموجى الأطول فى الشكل وهى 70°A تنتج من الانتقال $n=2$ الى $n=1$. وعلى هذا فالفوتون الذى طوله الموجى 0.07 nm الى القشرة سيحمل بعيدا طاقة قد فقدها الالكترون عند هبوطة من القشرة $n=2$ الى القشرة $n=1$. ولكا كانت 1240 nm تناظر 1 eV فإن 0.07 nm يجب أن تناظر طاقة قدرها 1240/0.07 أو حوالى 18,000 ev ، ومن ثم يكون فرق الطاقة بين هاتين القشرتين فى ذرات المولبيدنم الى 18.000 ev

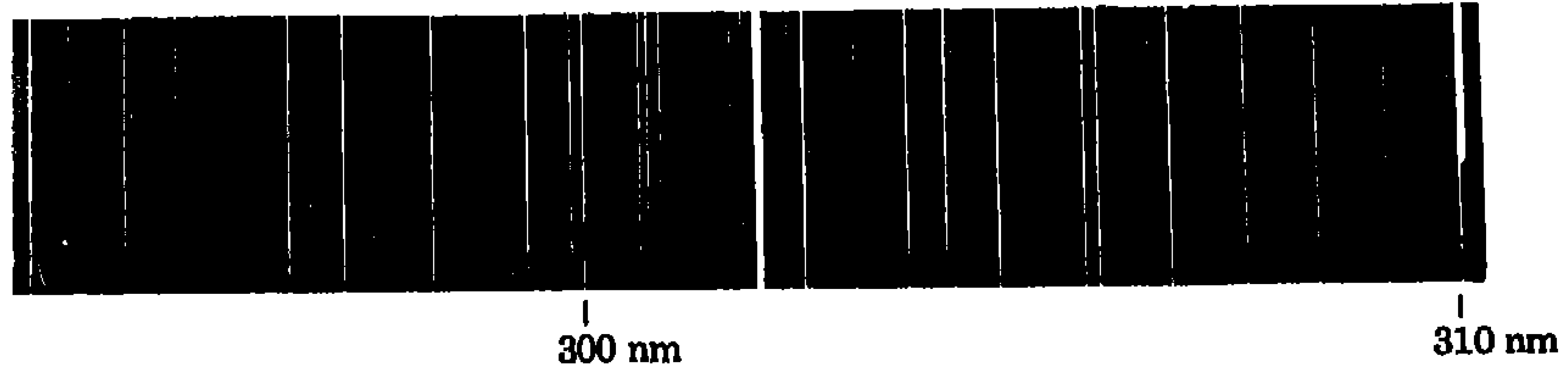
٢٧ – ١٢ الطيف الخطى والشريطى والمستمر .

يبلغ فرق الطاقة بين القشرتين $n=1$ ، $n=2$ عشرات الالآف من الالكترون فولت للذرات المحتوية على العديد من الالكترونات كما رأينا فى القسم السابق . وحيث

أن فروق الطاقة بين القشرات الداخلية بهذا القدر من الكبر لذا كثيرا ما يهمل التفاعل بين الكترون وآخر لصغر تأثيرة . على أنه حين نتقدم الى خارج الذرة نحو القشرات ذات قيم n المرتفعة نجد أن فروق الطاقة بين القشرات قد أصبح يقارن بطاقات التفاعل بين الالكترونات فى نفس الذرة . نتيجة لهذا ينشق كل مستوى طاقة – حسب بوهر – الى العديد من المستويات المحددة مما يعقد الرسم البيانى لمستويات الطاقة فى الذرة . ويجعل هذا التأثير مستويات الطاقة للالكترونات الخارجية ، تصير معقدة بشكل لا أمل فيه بالنسة لذرات كالحديد والذهب . ولما كانت الرسوم البيانية لمثل تلك الذرات تفتقر الى البساطة الأساسية التى لمستويات الأيدروجين لذا فان الطيف الخاص بالأطوال الموجية المبتعثة من تلك الذرات هو أبعد ما يكون عن البساطة .

الاطياف الخطية

فهناك عدد هائل جدا من خطوط الطيف لمعظم هذه الذرات ذات قيم Z العالية والتى تلاحظ للاشعاع المبتعث منها ، و ليس هناك انتظاما ملحوظا فى تلك الأطياف مثلما هو قائم فى متسلسلة بالمر مثلا . وكمثال على مقدار تعقيد هذا الطيف نرى الشكل ٢٧ – ١٧ حيث يعطى جانب صغيرا جدا من الطيف المبتعث من ذرات الحديد المبخرة فى قوس كهربى ساخن وهذا نموذج لأطياف الذرات ذات العدد الذرى الكبير . وعلى الرغم من هذه التعقيدات الا أن الطيف الخطى للعناصر يعتبر ذا فائدة عملية كبيرة . فحيث أن كل عنصر يصدر خطوط الطيف المميز له ، لذا يكتشف وجود هذا العنصر بسهولة بالطرق الطيفية . فالمادة يمكن تحليلها ، مثلا لدراسة مكوناتها الذرية بواسطة تبخيرها فى قوس ثم قياس خطوط الطيف الصادرة عن الذرات المستثارة فى بخار المادة . وهذا الأسلوب التقنى ، وهو دراسة طيف الأبتعاث ، يستخدم روتينيا لتعيين تركيب المواد غير العضوية كما وكيفا . يلاحظ أن الذرات فى هذا الأسلوب يتم تبخيرها ويتكون طيفها من خطوط طيفية محددة بما يطلق عليه **طيف خطى** راجع اللوحة الملونة التى تعطى أمثلة للاطياف الخطية .

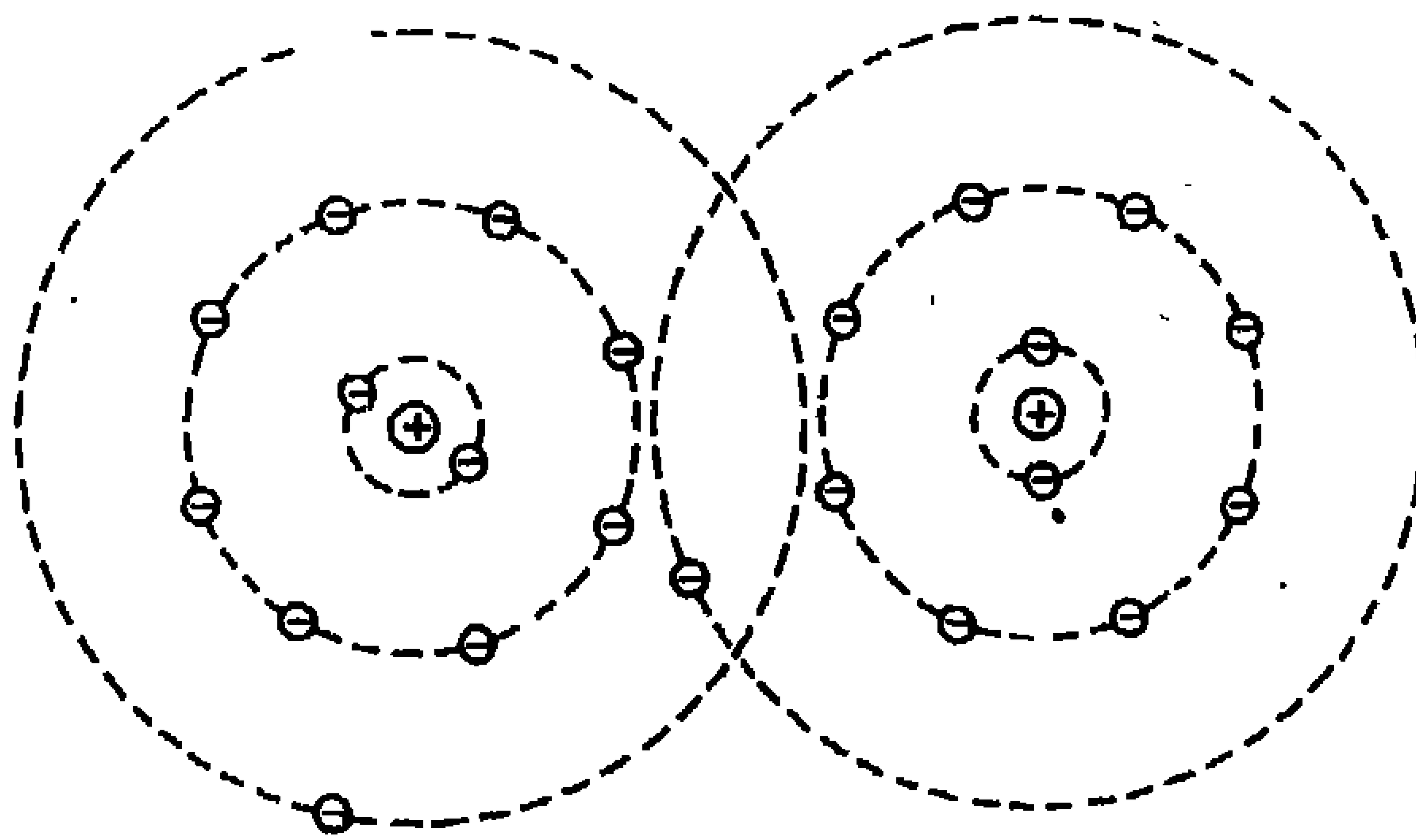


شكل (٢٧ – ١٧)
جانب صغير من طيف الحديد

قبل أن نستمر فى دراسة الطيف المبتعث (أو الممتص) بواسطة الذرات فى الجزيئات والاجسام الصلبة ، علينا أن نلخص متطلبات الطيف الخطى . ينشأ الطيف الخطى فى حالة ذرات متباعدة جدا عن بعضها البعض بحيث ينشأ موقف يمكن فيه الحديث عن قشرات الكترونية محددة حول النواة وحين يهبط الكترون من قشرة الى أخرى فان قدرا محددا بدقة من الطاقة هو الذى يفقد ومن ثم يبتعث طول موجى محدد من الضوء وهو نفسه الذى يصدر عن الذرات المتشابهة كلها وهذا الضوء يظهر كخط فى الاسبكترومتر - (المطياف) . يكون طيف الذرات المنفصلة ، اذن ، طيفا خطيا وبمجرد أن نبدأ فى تجميع الذرات معا لتكون سائلا أو صلبا فان هذه الصورة لا تعود صالحة .

اعتبر الذرتين الموضحتين فى الشكل ٢٧ - ١٨ وقشراتهما . تتأثر الالكترونات الموجودة فى القشرة الثالثة بشكل خطير بالذرة المجاورة ويصبح من الصعب القول بأن طاقة الالكترون فى هذه القشرة هى نفس طاقتة فى ذرة معزولة منفصلة . على أننا سنفترض للسهولة أن القشرات الداخلية ليست متراكبة بشكل خطير من جانب الذرة المجاورة ، وأن طاقات هذه القشرات لم تتغير بشكل كبير .

تؤدى الانتقالات الى قشرات أدنى إلى ابتعاث أطوال موجية قصيرة ، تقع عادة فى نطاق الأشعة فوق البنفسجية أو أشعة x . أما الأشعاع المرئى أو ما تحت الأحمر فيكون ناتجا عن الانتقالات فى القشرات الخارجية . يتضح من هذا ، أذن أن الضوء المرئى المبتعث يعتمد بشدة على مدى قرب الذرات من بعضها البعض بينما لا يتأثر ابتعاث الأشعة فوق البنفسجية أو أشعة x بهذا الأمر . وتؤكد الحسابات الدقيقة هذا التحليل عندما تتقارب الذرات المنفصلة تصبح طاقات الالكترونات الممكنة فى القشرات الخارجية غير محددة تماما ومن ثم لا يؤدى انتقال الالكترونات بين هذه القشرات الخارجية فى جسم صلب أو سائل الى ابتعاث خطوطا حادة للأطوال الموجية .



شكل (٢٧ - ١٨)
تميل الذرات فى جسم صلب الى التراكب ومن ثم تصير الطاقات المميزة للمدارات الخارجية سيئة التحديد وتصير خطوط الطيف منتشرة

حين يسخن جسم صلب أو سائل لدرجة أن يصدر عنه ضوء فان هذا الضوء ينبعث عندما تهبط الالكترونات الذرية الخارجية من قشرة خارجية الى أخرى . وحيث أن هذه القشرات وطاقاتها تعتبر منتشرة لذا ينبعث مدى بأكمله من الأطوال الموجية . والطيف بهذا لا يعود محتويا على خطوط طيفية مرئية محددة وانما يتكون بدلا من هذا من تشويش لونى مستمر وعريض لا يلحظ فيه أثر لخطوط متفردة . يسمى هذا النوع من الطيف **طيفا مستمرا** .

الطيف المستمر

وينبعث هذا الطيف من الأجسام المتوهجة مثل المعادن ~~المنصهرة~~ أو الفتيلة الساخنة فى مصباح للاضاءة . ويمكن رؤية مثال على هذا النوع من الطيف فى اللوحة الملونة السابقة . وحيث أنه لا يرى أية خطوط طيفية محددة فى الطيف المستمر لذا يصبح غير مفيد فى تحليل التركيب الجزيئى لجسم صلب .

الأطياف الشريطية

النوع الثالث **من الطيف هو الطيف الشريطى** ، وهو ينبعث من الجزيئات . وهذا النوع وسط بين طيف الأجسام الصلبة وطيف الذرات الحرة . وبتقريب أولى يمكن القول بأن ادخال ذرة فى جزىء لا يغير كثيرا من طيف الانبعاث الذرى ، فمستويات الطاقة المميزة لالكترونات التكافؤ فقط هى التى يعتريها التغير الخطير . على أن ادخال الذرات فى جزىء ما يؤدى الى ظهور مجموعة جديدة بأكملها من مستويات الطاقة ، التى تميز ذبذبات تتضمن الروابط الممسكة بالذرات معا داخل الجزىء .

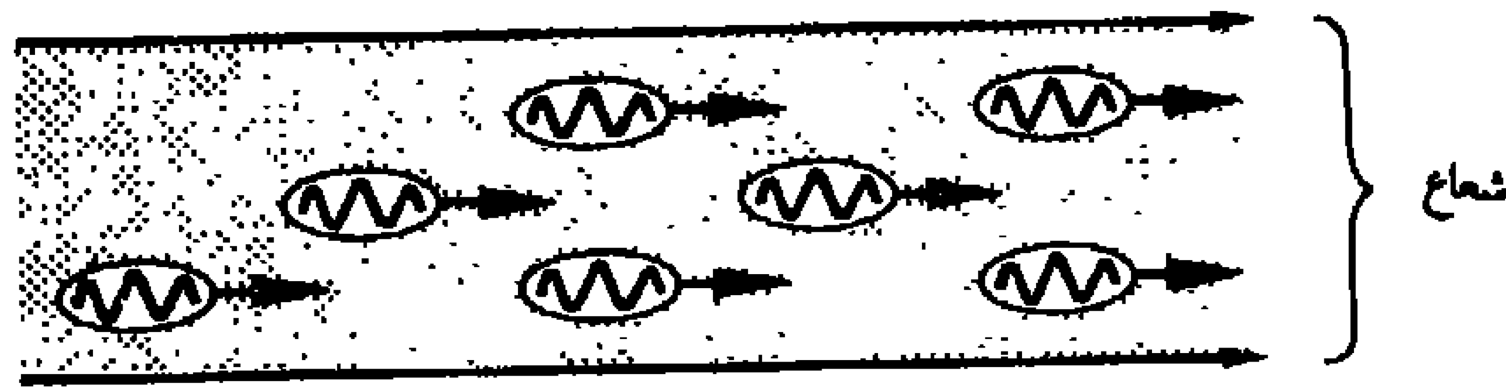
ولعلك تذكر أن بلانك قد اكتشف أن أى نظام يتذبذب بتردد طبيعى مقداره ν_0 سيكون له سلسلة من مستويات الطاقة يفصل بين كل اثنين منها طاقة قدرها $h\nu_0$. وفى الحقيقة لكل رابطة كيميائية مختلفة تردد مميز للذبذبة وتؤدى الرابطة الى سلسلة مميزة من مستويات الطاقة . ومن الأمثلة النموذجية تردد الرابطة C-N الذى يبلغ 3.24×10^{12} Hz وتردد C-C الذى يبلغ 3.4×10^{12} Hz, وتردد C=C البالغ 6.5×10^{12} Hz

عندما يهبط جزىء مهتز من مستوى طاقة اهتزازية الى آخر فان فوتونا من الطاقة $h\nu_0$ ينبعث . وهذه الطاقة تبلغ 0.014 eV فى حالة رابطة C-C وتؤدى الى فوتون له $\lambda = 88,000$ nm وهو طول موجى يقع فى المدى تحت الأحمر . تعتبر الفوتونات المنبعثة مميزة للرابطة الجزيئية ويمكن استخدامها فى التعرف على الروابط داخل الجزيئات . وهذا الاسلوب التقنى المعروف باسم دراسة **طيف الأشعة تحت الحمراء** ، يستخدم روتينيا لتحليل والتعرف على المركبات العضوية .

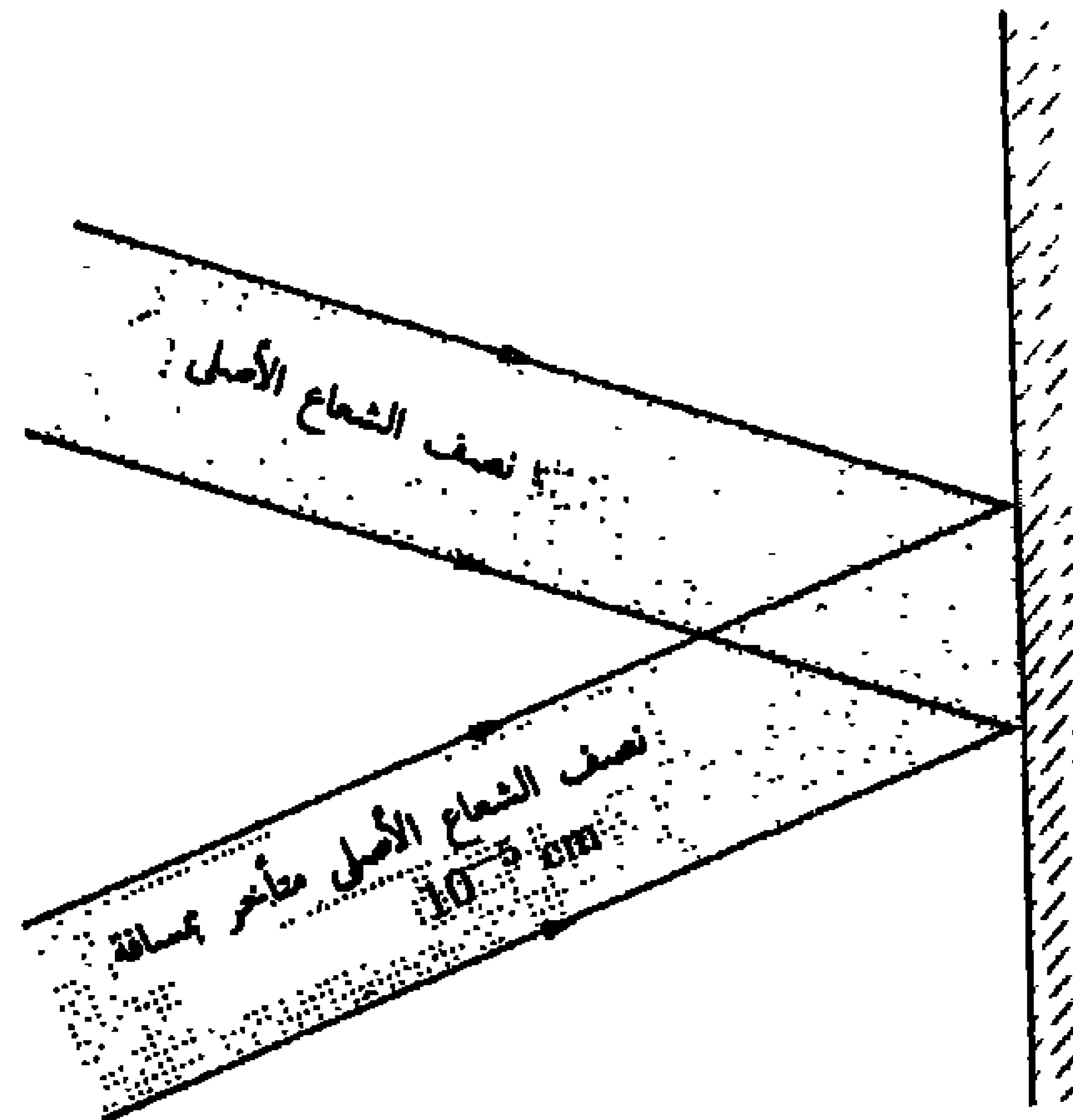
٢٧ – ١٣ التماسك (Coherency)

لقد وجدنا أن الضوء واشعاعات ك.م.ج أخرى تبتعث من الذرات والجزيئات عندما تهبط من حالة مستثارة الى حالة ذات طاقة أدنى . ويبعث فوتون عند كل انتقال . ويعطى تردد الموجة فى نبضة الطاقة بالمعادلة الطاقة $=h\nu$ ولكن الموجة تمتد لمسافة قصيرة جدا فى الفضاء وقد حاولنا أن نمثل الموقف بطريقة تخطيطية فى الشكل ٢٧ – ١٩أ .

فكما هو مبين هنالك ، يتكون شعاع الضوء أحادى اللون من فيض من كمات الضوء . وكل من هذه الكمات ذو طول محدد ويحتوى على عدد محدود من الأطوال الموجية على امتداد طوله . (أكثر مما هو مبين) ولكل هذه النبضات نفس الأطوال الموجية تقريبا لأنها نشأت من انتقال ذرى وحيد ، على الرغم من ان كل منها ابتعث من ذرة مختلفة . ونتيجة لهذا ليست هناك أية علاقة محددة فى الزمن أو الموضع بين هذه النبضات ، فهى قد ابتعثت عشوائيا من الذرات ولذا يكون لموجاتها علاقات طورية عشوائية بالنسبة لبعضها البعض . يطلق على شعاع كهذا – تكون فيه



(أ) فوتونات غير متماسكة



(ب) أشعة متماسكة

شكل (٢٧ – ١٩) تمثيل تخطيطى لشعاع من الضوء العادى (فوتونات غير متماسكة) (ب) باستخدام شعاع مزدوج أو الانعكاس من على غشاء رقيق يمكن فصل الشعاع الى شعاعين متماسكين .

للفوتونات أطوار (و/أو) أطوال موجية عشوائية – شعاع أو نبضة متماسكة ، 　**تعريف**

نبضات الشعاع غير المتماسكة

لنعتبر ما يحدث حين يسقط مثل هذا الشعاع على ساتر أو على شبيكة العين . قد يسقط فوتونان أو أكثر فى نفس البقعة فى نفس اللحظة ، فاذا كانت موجاتهما متطاورة فان شعاتهما تجمع وتقوى كل منهما الأخرى أما اذا اختلفتا فى الطور بزاوية قدرها $180°$ فان احداهما تلغى الأخرى . وحيث أن النبضات عشوائية الطور بالنسبة لبعضها البعض لذا فستحدث تقوية والغاء (وأى شيىء بينهما) كلما تقدم الزمن وسقطت الفوتونات على الساتر . لو استطعنا أن نسجل شدة الضوء ونبين تفاصيل تغيرها لفترات تصل فى القصر الى $10^{-10}s$ لسجلنا شدة ضوء متغيرة بشكل كبير على الساتر . وسيكون هذا سجلا للتقويات والالغاءات للفوتونات عندما تسقط على الساتر .

ولكن معظم نبيطات قياس الضوء ، بما فى ذلك العين ، تسجل فقط متوسط الشدة خلال فترة زمنية أطول بكثير من $10^{-10}s$. ونتيجة لهذا فان شعاع الفوتونات غير المتماسك سيبدو لامعا وان كان ليس فى لمعان شعاع فوتوناته يقوى بعضها الآخر . وحتى لو حدثت إلغاءات داخل الشعاع ، فانها تستمر لفترة قصيرة جدا لاتكفى لادراك أية ظلمة . وحتى بهذا فمن الممكن احداث تداخل بمثل هذا الشعاع كما سنرى الآن .

افترض أن شعاع الشكل ٢٧ – ١٩ (أ) قد قسم الى جزئين بواسطة شق مزدوج أو بالانعكاس من على سطحى غشاء رقيق . ولنفترض بعد ذلك أن كل فوتون يتكون من نبضة موجية طولها 30 cm* ، أى أن النبضات المبينة فى الشكل يبلغ طولها 30 cm ، فاذا ما أعيد وصل الشعاعين (كما فى الشكل ٢٧ – ١٩ ب) بعد أن يكون احدهما قد قطع مسافة أبعد من الآخر بقليل ، فان نصفى كل فوتون سيوصلان وهما متفاوتان فى الطور بدرجة ضئيلة وتكون النتيجة أن كل فوتون قد شق الى نصفين بالطول وتكون سعة كل منهما أقل وفيما عدا هذا لا يطرأ أى تغيير على الفوتونات . أحد نصفى الفوتون قد امسك بالخلف بالنسبة للنصف الآخر ، ثم اعيد وصل النصفين . وطالما كان الفرق فى طول المسار صغيرا بالمقارنة بطول النبضة الموجية فان تأثيرات واضحة للتداخل ستظهر عندما يعاد وصل نصفى الموجه . فاذا كان فرق المسار مساويا $n\lambda$ (حيث n عدد صحيح) فان تداخلا بناءا وسطوعا سيظهران على الساتر . أما اذا كان فرق المسار مساويا($n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$) فان تداخلا اتلافيا هو

---

* افترض على سبيل المثال أن الذرة يلزمها زمن قدرة $10^{-9}s$ لكى تهبط من حالة الى أخرى ، وخلال هذه تبتعث نضة . الطرف الأمامى للنبضة سينتقل مسافة قدرها $ct = 0.3m$ فى تلك الفترة ولهذا يكون طول النبضة 30 cm

الذى يحدث ويلاحظ اظلام على الساتر . وهذا هو بالضبط ما يحدث فى تجارب التداخل التى وصفت فى الفصل الخامس والعشرين .

يؤدى الشعاعان المبينان فى الشكل ٢٧ – ١٩ ب الى تأثيرات مرئية للتداخل على الساتر وهذا يرجع الى أن النبضات الموجية التى تسقط على الساتر من الشعاعين متطابقة وبين بعضها البعض علاقات طورية ثابتة ولذا يقال أن هذين الشعاعين متماسكان . تتكون **الأشعة المتماسكة** من نبضات موجية تتناظر تماما فى كل من الشعاعين وتحتفظ بينها علاقات طورية ثابتة .

تعريف الأشعة المتماسكة

من الطريف أن الشعاعين يفقدان تماسكهما اذا تأخر احدهما عن الآخر مسافة أبعد من اللازم ، فكل نبضة موجية لها طول محدود فاذا كان فرق المسار للشعاعين أكبر من اللازم فان النبضات لن تعود قادرة على الاتصال عند قمة بعضها البعض عندما يعاد وصل الشعاعين . وبدلا من هذا سيتم جمع فوتونات لا علاقة بينها معاً وكل ما سيوجد هو فرق عشوائى فى الطور . ولن يلحظ أى الغاء أو تقوية طويلة المدى .

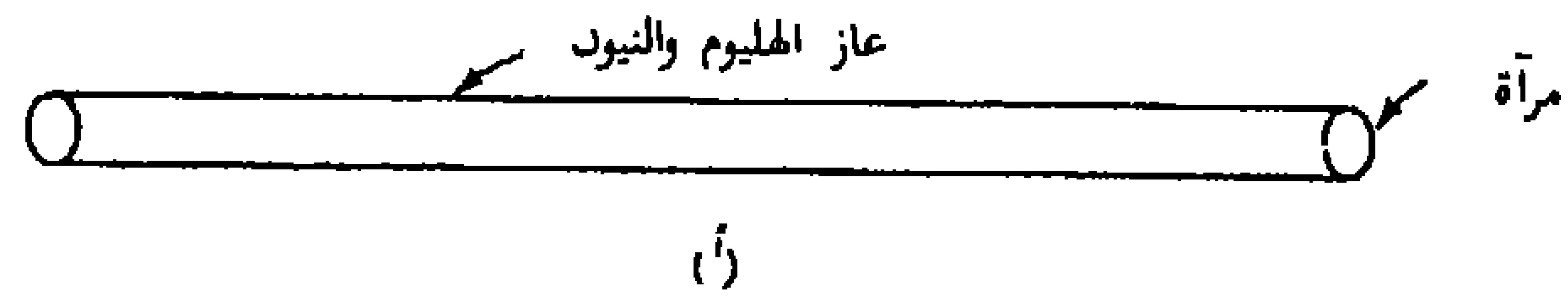
وكما نرى فان النبضات الموجية المنفردة فى شعاع ضوئى عادى ليست متماسكة ، فالموجة فى احدى النبضات تكون لها علاقات طورية مختلفة تماما عن علاقات الطور للموجات التى فى نبضات أخرى . أما الضوء الذى نراه من مثل ذلك الشعاع فهو متوسط حصيلة تأثيرات عشوائية وسريعة جدا للتداخل . ولكن اذا شطر الشعاع الى نصفين ، فيمكن اعطاء كل نصف منهما علاقة طورية محددة بالنسبة للآخر ، ثم اذا جمع الشعاعان المنفصلان مرة أخرى بحيث يصبح الشعاعان متماسكين فان تأثيرات ملحوظة للتداخل سوف تصبح مرئية . على الرغم من أن التقوية يمكن أن تحدث بين جزئى الشعاع ، الا أن شدة الشعاع ستظل محدودة بحقيقة أن النبضات الموجية المنفردة ليست متماسكة . سنتعلم فى القسم التالى أشياء عن مصدر الضوء الذى يصدر نبضات موجية متماسكة .

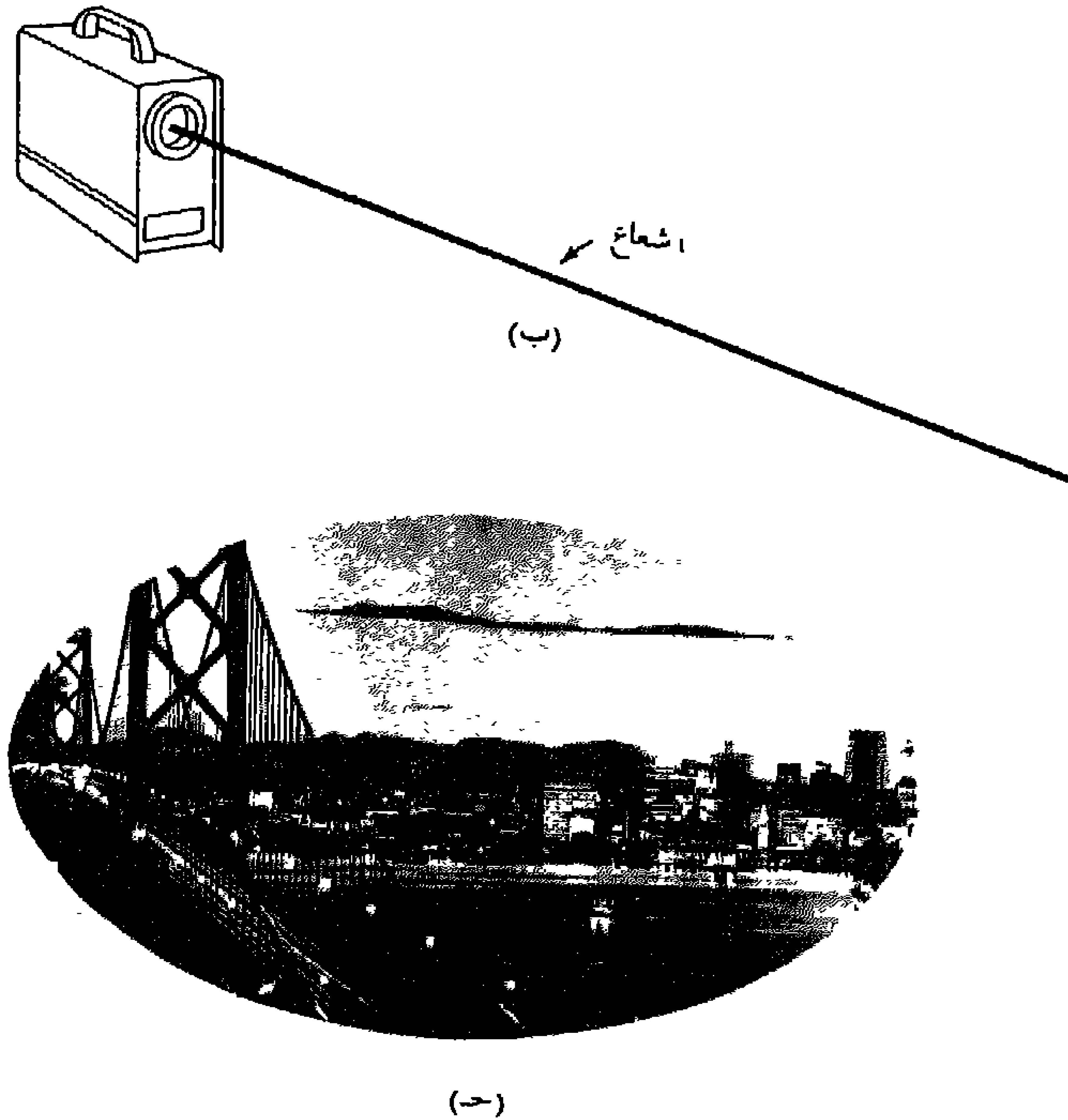
٢٧ – ١٤ الليزر

سنوجه اهتمامنا الآن نحو نبيطة ذات طراز مميز ، تستخدم حقيقة أنه تحت ظروف خاصة جدا يمكن جعل الذرات تبتعث موجات ضوئية متطاورة كلها مع بعضها البعض ، وغالبا ما تعمل الذرات فى جميع المصادر الضوئية مستقلة عن بعضها البعض ، أى أن ابتعاث فوتون من ذرة ما لا يوجد بينه وبين ابتعاث فوتون من ذرة أخرى أى تنسيق أو ترابط . نتيجة لهذا يتكون شعاع الضوء من خليط معقد من الأمواج الكهرمغناطيسية الصادرة عن ذرات مختلفة . وليست كل هذه الذرات متطاورة

بالطبع مع بعضها البعض ولذا فهى أحيانا تجمع وأحيانا تلغى . وقد وجدنا فى القسم السابق أن هذا يجعل شعاع الضوء أقل كثيرا فى الشدة عما اذا كانت كل الذرات متطاورة عند ابتعاثها للموجات . وينشأ شعاع شديد جدا اذا ما أجبرت جميع الذرات على أن تبتعث موجاتها معا وهى متطاورة . وهناك مصدر ضوئى يقترب كثيرا من تحقيق هذا الهدف وهو ما يسمى **الليزر** .

هناك أنواع كثيرة متاحة من الليزر ولكنها جميعا تعمل بنفس المبدأ الذى اشتق اسمها منه وهو تكبير الضوء بواسطة الابتعاث المستثار للاشعاع (*l*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation) سنقوم الآن بوصف ليزر الهليوم – النيون الغازى وهو يعطى شعاعا ضوئيا متصلا . يبين الشكل ٢٧ – ٢٠ الخطوط الرئيسية لليزر الهليوم نيون الغازى وهناك أيضا تمثيل لنوعية الشعاع الدقيق الضيق الذى يصدره هذا الليزر .





(جـ)

شكل (٢٧ – ٢)

على الرغم من أن الليزر الذى تنتجه الكترو أو بتكس أسوشيتس (ب) له خرج مقداره 0.0005 W فقط ، الا أن شعاعه الضيق يسطع بلمعان على بعد (ج) ولدواعى المقارنة لاحظ الاضواء الاقل سطوعا الصادرة من مصابيح عالية الشدة على جسرسان فرنسيسكو خليج أوكلاند . (الكترو اوبتكس اسوشيتس ، بالوالتو ، كاليفورنيا) .

يتكون قلب الليزر من انبوبة زجاجية تحوى غازى الهليوم والنيون عند ضغط منخفض نسبيا . يثبت عند طرفى الانبوبة لوحان زجاجيان على اقصى درجة من التسطح وهما متوازيان مع بعضهما البعض بدقة شديدة . وقد غطى كل لوح ليصبح بمثابة مرآة ، الا أن أحد اللوحين قد خففت تغطيته بحيث يسمح بمرور واحد فى المائة من الضوء الساقط عليه من الداخل لكى يتسرب من خلاله ويغادر الانبوبة .

وليس أى غازين يمكنهما تكوين ليزر غازى . فالغازان اللذان اختيرا فى هذه الحالة بينهما علاقات خاصة جدا وكل منهما يؤدى وظيفة داخل الانبوبة ، فأحد الانواع وهو ذرات الهليوم هى بمثابة مصدر للطاقة بالنسبة للنوع الاخر وهو النيون فى هذه الحالة . وعلى ذرات الهليوم بدورها أن تنال هى الأخرى قسطا من الطاقة وهذا يتم بواسطة تفريغ كهربائى عالى التردد جدا داخل الأنبوبة . ويعمل الهليوم بداخل الانبوبة أساسا كأى غاز فى أية أنبوبة تفريغ غازية كمصباح بخار الزئبق مثلا . ينتج فرق الجهد المرتفع على الانبوبة تفريغا غازيا‌ًما يجعل الكثير من الايونات والالكترونات النشطة تتقاذف هنا وهناك داخل الانبوبة . ثم تصدر ذرات الهليوم المستثارة عندئذ الطيف العادى للهليوم وذلك عندما تهبط الالكترونات عائدة الى المستوى $n = 1$. على أن الضوء الصادر عن هذا التأثير يشكل كسرا صغيرا جدا من كمية الضوء المبتعثة من الأنبوبة .

من الطبيعى أن الالكترونات فى ذرات الهليوم تقذف الى أعلا نحو جميع مستويات وحالات الطاقة الممكنة للذرة وذلك بواسطة التصادمات بداخل الانبوبة . وقد وجد أن هناك حالة واحدة تكون فيها الطاقة أعلى بما قيمته 20.6 eV عن الحالة $n = 1$ وهذه الحالة تسمى **حالة مؤقتة الاستقرار** . وفى هذه الحالة يقاوم الالكترون الهبوط الى حالات سفلى ولذا تظل الذرة على تلك الحالة لفترات زمنية طويله بشكل غير عادى . على أن تركيب مستويات الطاقة فى ذرة النيون مهيأ بحيث أنه عند تصادم ذرة الهليوم بذرة النيون تقوم ذرة الهليوم المستثارة باعطاء طاقتها لذرة النيون . وفى الواقع ، فإن لذرة النيون المستثارة طاقة أكبر بقليل من طاقة ذرة الهليوم ، وفرق الطاقة هذا يمكن ايجاده من ط . ح . التى تكتسبها الذرة عند التصادم .

واليك ماقد حدث . لقد استثيرت ذرات الهليوم فى التفريغ الغازى وقد ألفت بعض الذرات أنفسها فى حالة مؤقتة الاستقرار وأخذت تتجول هنا وهناك حتى تم التصادم بينها وبين ذرة نيون فأخذت ذرة النيون – أثناء التصادم – الطاقة من ذرة الهليوم وأصبحت فى حالة مستثارة . وهذه الحالة اتضح أنها أكثر استقراراً فى ذرة النيون ولذا لا يهبط الالكترون فيها الى حالة أدنى دفعة واحدة . وبمرور الوقت تقوم ذرات الهليوم باستثارة المزيد من ذرات النيون التى تصبح فى وضع الانتظار حتى تشع طاقاتها . وحين تفعل ذلك فانها تهبط الى مستوى يقل بمقدار 1.96 eV وتطلق فى هذه العملية اشعاعا كهرمغناطيسيا طوله الموجى 6328 Å ويقع فى المدى الاحمر . وهذا ليس

مفيدا فى حد ذاته لأننا سنكون قد استعدنا ما كان يمكن لذرات الهليوم نفسها أن تشعه ببساطة . وتتأتى الفائدة من أننا نستطيع الآن أن نتحكم فى ذرات النيون ونجعلها تبتعث موجاتها وهى متطاورة .

على الرغم من حقيقة أن ذرات النيون تمانع فى الهبوط الى مستوى أدنى للطاقة الا أن بعضها يفعل ذلك فى النهاية مما يؤدى الى اطلاق نبضة من الاشعاع ك.م بطول موجى $\lambda = 6328$ Å فى الأنبوبة . وعند مرور هذه النبضة داخل الأنبوبة فانها تصادف ذرات نيون مستثارة فتعرضها لمجال ك.م متذبذب بتردد مطابق لتردد الضوء الذى يجب على الذرة المستثارة أن تبتعثه . وهذا المجال المتذبذب فعال للغاية فى جعل ذرة النيون المستثارة تهبط الى حالة أدنى ، وهى تفعل هذا بطريقة يكون فيها الفوتون الذى تطلقه ذو موجة متطاورة تماما مع الأشعاع الذى استثار الذرة حتى تبعث الفوتون .

عندما تنعكس هذه الموجات جيئة وذهابا بين طرفى الأنبوبة فانها تتراكم بشكل كبير نتيجة للموجات المطابقة التى تبعثها ذرات النيون الأخرى نتيجة استثارة هذه الموجات لها . وتبعا لذلك تتواجد بالأنبوبة مجموعة قوية جداً من النبضات الموجية المتماسكة ذات الطول الموجى 6328 Å ويغادر جانب صغير من هذا الأشعاع الأنبوبة خلال المرآة التى بها تسرب طفيف عند أحد أطراف الأنبوبة ، ويكون هذا هو شعاع الليزر . وعلى عكس ما يحدث فى مصدر ضوئى عادى فان ذرات النيون كلها قد جمعت أشعاعها معا بحيث صارت كل الموجات متعاونة ، أى أن النبضات الموجية كلها يقوى بعضها البعض ويكون الشعاع الناتج شديدا جدا .

بالاضافة الى ذلك ، فان حقيقة انعكاس الشعاع جيئة وذهابا عددا كبيرا من المرات بين المرآتين المتوازيتين يجعل الأشعة الضوئية تخرج مستقيمة من طرف الأنبوبة . واذا انفلت أحد الأشعة بعيدا عن محور الأنبوبة فانه يفقد من الجدران الجانبية أثناء الرحلات العديدة أماما وخلفا داخل الأنبوبة . ومن الأهمية بمكان أيضا كون الشعاع عبارة عن حزمة دقيقة . فعلى عكس الضوء الصادر من مصباح ، لا تنتشر الطاقة فى الفضاء . وبدلا من هذا تسرى فى الفضاء خلال أسطوانة دقيقة وتحتفظ بشدتها لمسافات طويلة جدا . فالليزر المبين فى الشكل (٢٧ – ٢٠) ، مثلا ، تبلغ قدرته عند الخرج 0.0005 W فقط ، الا أن الطاقة الضوئية محصورة فى حزمة ضيقة بحيث أن الشعاع المعترض يفوق فى الضياء المصابيح ذات الطاقة العالية والتى تبدو فى المنظر الأمامى . بل أن أشعة الليزر التى ترسل الى القمر ثم تنعكس الى الأرض مرة أخرى كثيرا ما تستخدم لعمل قياسات على ظهر القمر .

وقد تم استخدام أجهزة ليزر قوية ذات خرج يبلغ عدة واتات فى كثير من التطبيقات فى السنوات الأخيرة . ولاشك أنك تعرف باستخدامها فى جراحات العيون وازالة الأورام الخبيثة وكثير من التطبيقات الطبية المماثلة . ويقوم الجراحون الآن باستعمالها بشكل روتينى . وتستخدم الليزرات الأكبر قدره فى لحام المعادن بواسطة الحرارة الهائلة التى تتولد عند إمتصاص الشعاع داخل المادة . ويمكن اضافة المزيد من التطبيقات التى تنمو قائمتها يوما بعد يوم ، فنقل المعلومات ، مثلا ، عبر مسافات شاسعة بواسطة أشعة الليزر قد أصبح حقيقة واقعة فى زمننا هذا . أما فى البحث العلمى فقد أصبح الليزر الضوئى فعلا من الأدوات النافعة . ومن الطريف أن ندرك أنه كان سيصبح من المستحيل تصور أو ادراك هذا المصدر الضوئى الهام بدون كمية المعلومات الأساسية عن الذرات ومستويات طاقتها وسلوكها والتى كدسها كثير من العلماء فوق ما يزيد على نصف قرن . أى أن هذا يعتبر مثالا حيا على كيفية تأدية المعرفة المتزايدة عن الطبيعة الى طرق أفضل لاستخدام قوانينها .

ملخص

يبلغ قطر الذرة حوالى 10^{-10} m وتتكون من نواة موجبة الشحنة قطرها حوالى 10^{-15} . اذا كانت الشحنة النووية هى $+Ze$ فان هناك Z الكترونا فى ذلك الجزء من الذرة خارج النواة .

تبعث ذرات الأيدروجين المستثارة ضوءا تشكل أطواله الموجية عدة متسلسلات للخطوط الطيفية . ويمكن تمثيل تلك المتسلسلات بالعلاقة $1/\lambda = R(1/p^2 - 1/n^2)$ ، حيث $n > p$ وكلاهما عدد صحيح . عندما تكون $p = 1$ فاننا نجد متسلسلة ليمان فى المدى فوق البنفسجى ، وعندما $p = 2$ تنتج متسلسلة بالمر وهى تقع جزئيا فى المدى المرئى من الطيف . أما حين تكون $p = 3$ فان متسلسلة باشن توجد فى المدى دون الأحمر .

لقد استطاع بوهر أن يفسر طيف ذرة الأيدروجين بوضع الفروض التالية : يدرو الالكترون حول النواة فى مدارات مستقرة معينة حيث لا تشع أية طاقة ، تعطى أنصاف أقطار هذه المدارات بشرط كمى تخضع له كمية التحرك الزاوى وهو: $mvr_n = nh/2\pi$ ، تفقد الذرة طاقة عندما يهبط الالكترون من مدار خارجى الى آخر داخلى ، وتنبعث هذه الطاقة على هيئة فوتون طاقته $h\nu$. كما أنه استطاع اثبات أن مستويات طاقة ذرة الأيدروجين تعطى بالعلاقة $E_n = 13.6/n^2$ eV .

يمكن للذرات أن تستثار الى حالات أعلى للطاقة عن طريق التصادمات التى تقع عند درجات الحرارة العالية أو فى تفريغ كهربى . كما أن الفوتونات الساقطة يمكنها أن تستثير الذرات بشرط أن تكون طاقة الفوتون مساوية تماما للطاقة اللازمة لرفع الذرة الى مستوى أعلى . تمتص ذرات الأيدروجين الأطوال الموجية فى متسلسلة ليمان .

افترض دى برولى أن الالكترون له طول موجى مصاحب يبلغ $\lambda = h/mv$ ويمكن تفسير مدارات بوهر على أنها مسارات رنين لموجات الالكترون . وهذا التفسير يبرر الشرط الكمى الذى وضعه بوهر لكمية التحرك الزاوى .

تصوغ معادلة شرودنجر الطبيعية الموجية للجسيمات بطريقة كمية ، اذا أن حلها يدلنا على كيفية توزيع الالكترونات داخل الذرات . وتدل أيضا على أن المدارات الدائرية حسب بوهر صحيحة من الناحية الكيفية فقط ، يبين حل سرودنجر أن هناك أربعة اعداد كمية على درجة من الأهمية : n ، l ، m_l ، m_s . وهذه الاعداد يمكنها أن تتخذ القيم التالية : $n = 1, 2, 3, ..$ ، $l = 0, 1, .. n\text{-}1$ ، $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm l$; $m_s = \pm\frac{1}{2}$.

يتأثر تركيب الذرات عديدة الالكترونات تأثرا كبيرا بمبدأ باولى للاستبعاد الذى ينص على أنه لا يوجد الكترونا فى نفس الذرة ولهما نفس مجموعة الأعداد الكمية . ولذا لا يوجد فى القشرة $n = 1$ سوى الكترونين أما فى القشرة $n = 2$ فلا يوجد سوى ثمانية الكترونات وهكذا . ويؤثر التركيب القشرى للذرات تأثيراً ، بالغا فى خواصها الكيميائية .

تنتج أشعة X عندما تصطدم الكترونات عالية الطاقة جسيما صلبا . تنبعث أشعة X المميزة من عناصر ذات Z عالية عندما تحدث الانتقالات الالكترونية فى القشرات الداخلية . تبعث الذرات الغازية أطيافا خطية حين تكون ساخنة بينما تبعث الأجسام الصلبة والسوائل المتوهجة طيفا مستمرا .

يقال لموجتين أنهما متماسكتان اذا كان لهما نفس الشكل وتحتفظان بنفس العلاقات الطورية. تؤدى الموجات المتماسكة الى تأثيرات للتداخل تستمر لفترات زمنية طويلة . يتكون الضوء العادى من نبضات موجية غير متماسكة . أما نبضات الموجات الضوئية لليزر فهى ليست فقط متماسكة وانما هى أيضا متطاورة مع بعضها البعض . ولهذا يمكن جعل تفرق الأشعة فيها صفرا .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تصف تجربة رذرفورد وتشرح كيف تؤدى الى مفهوم الذرة النووية .

٢ – أن تذكر القطر التقريبى للذرة .

٣ – أن ترسم رسما تخطيطيا لمتسلسلة بالمر وأن تكتب صيغة بالمر . أن تحسب الطول الموجى لخط معين من متسلسلة بالمر اذا أعطيت ثابت رايدبرج . وأن تكرر هذا بالنسبة لكل من متسلسلة ليمان ومتسلسلة باشن . أن تذكر أى المتسلسلات تقع جزئيا فى المنطقة المرئية .

٤ – أن تصف نموذج بوهر لذرة الأيدروجين وأن تعطى أثناء الوصف افتراضاته بالنسبة للمدارات المستقرة وانبعاث الضوء . أن تشرح على أساس هذا النموذج كيف تنتج المتسلسلات الطيفية المختلفة .

٥ – ان ترسم رسما بيانيا لمستويات الطاقة لذرة احادية الالكترون بسيطة عندما تعطى صيغ طاقاتها . أن تبين على الرسم البيانى لمستويات طاقة الأيدروجين كيف تنشأ المتسلسلات المختلفة .

٦ – أن تشرح لماذا تمتص ذرات الأيدروجين الأطوال الموجية لمتسلسلة ليمان بشكل طبيعى ولا تمتص تلك التى لمتسلسلة بالمر .

٧ – أن تصف كيف يمكن استخدام المفهوم الموجى لدى برولى لتفسير اختيار بوهر للمدارات المستقرة .

٨ – أن تشرح معنى الرسم البيانى للتوزيع الألكترونى كالذى فى الشكل (٢٧ – ١٤) .

٩ – أن تذكر نص قاعدة باولى للاستبعاد وأن توضح لماذا تتنبأ بأن الليثيوم أحادى التكافؤ .

١٠ – أن تشرح كيف تنتج أشعة X فى أنبوبة أشعة X . وأن تميز بين الأشعة المميزة وأشعة الفرملة . أن تحسب أقصر طول موجى لأشعة X يمكن أن ينبعث من هدف صدم بالكترونات ذات طاقة عالية معينة .

١١ – أن تميز بين الطيف الخطى والمستمر وأن تشير الى أنواع المصادر الضوئية لكل منها .

١٢ – أن تشرح الفرق بين الموجات المتماسكة وغير المتماسكة .

١٣ – أن تذكر السمات الأساسية لشعاع الليزر بالنسبة للتماسك ، الطور ، ونوعيته الدقيقة وأن تذكر كيف تؤدى هذه السمات الى الأستخدامات التخصصية لليزر .

مصطلحات وعبارات هامة :

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

الذرة النووية

المتسلسلة الطيفية ، حد المتسلسلة

متسلسلات ليمان وبالمر وباشن

ذرة بوهر وفروضه

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

الرسم البيانى لمستويات الطاقة .

طاقة التأين ، الحالة الأرضية

مبدأ باولى للاستبعاد .

القشرات الذرية

أشعة - x المميزة ، أشعة الفرملة

الطيف الخطى ، الطيف المستمر .

الموجات والأشعة المتماسكة

الليزر

أسئلة وتخمينات

١ - لماذا لا يتوهج غاز الأيدروجين الذى يحضره الطلاب فى المعمل ولا يصدر ضوءا ؟

٢ - أعطيت أنبوبة بداخلها قطبان ومقفلة جيدا عند طرفيها وكان الغاز الذى تحتوية هو إما أيدروجين أو هليوم . كيف يمكن تحديد نوع الغاز دون أن تكسر الأنبوبة ؟ اذا كان الغاز تحت ضغط مرتفع فما هى الصعوبات التى قد تعترضك ؟

٣ - يمتص غاز الأيدروجين عند درجة حرارة الغرفة ضوء ذا طول موجى يناظر خطوط متسلسلة ليمان ولكنه لا يمتص أطوالا موجية من متسلسلة بالمر . لم لا ؟

٤ - عندما يمر ضوء أبيض خلال وعاء يحتوى على غاز الأيدروجين فانه يلاحظ أن أطوالا موجية من متسلسلة بالمر وكذا متسلسلة ليمان يتم امتصاصها ونستنتج من هذا أن الغاز ساخن جدا . لم استنتجنا هذا الاستنتاج؟ (هذا هو فى الواقع الاساس لاحدى طرق قياس درجة حرارة غاز ساخن) .

٥ - تكون الخطوط الطيفية المبتعثة من قوس متكون فى غاز الأيدروجين تحت ضغط منخفض جدا - أكثر حدة بكثير من تلك الخطوط المتكونة فى أنبوبة تفريغ عند ضغط عال . أشرح .

٦ - أشرح بوضوح لماذا لا تشاهد خطوط ابتعاث أشعة x فى المدى 1A° وذلك اذا صدرت أنبوبة أشعة x تستخدم كهدف فى الأنبوبة معدنا عدده الذرى منخفض .

٧ - لماذا تصدر الأجسام الصلبة الساخنة طيفا مستمرا بينما تصدر الغازات الساخنة طيفا خطيا ؟

٨ - تشك احدى شركات الصلب فى أن احدى منافساتها تضيف الى منتجاتها (منتجات الشركة المنافسة) كسرا صغيرا من النسبة المئوية من عنصر أرضى نادر . كيف يمكن تحديد هوية العنصر ومعرفة تركيزة بسرعة ؟

٩ - هناك شك فى أن كمية معينة من البنزين تحتوى على أثر ضئيل من الاسيتون كشائبة . ما هى الطرق العملية الموجودة لاختبار صحة هذا الشك ؟

١٠ - فى ذرة الهليوم يكون الالكترونان على نفس القشرة ولكن كل منهما يتجنب الآخر بدرجة كافية بحيث يكون التفاعل بينهما ذا درجة ثانويةمن الأهمية . قدّر قيمة طاقة التأين (بالالكترون فولت) للهليوم أى الطاقة اللازمة لاطلاق سراح أحد الالكترونين وقدّر أيضا الطاقة اللازمة لاطلاق سراح الالكترون الثانى . أى هاتين القيمتين موثوق بها أكثر ؟ (ق)

١١ - تبلغ قيمة طاقة التأين لليثيوم ، الصوديوم والبوتاسيوم القيم التالية على الترتيب ، 5.4 و 5.1 و 4.3 ev بينما هى للهليوم والنيون والارجون 24.6 و 21.6 و 15.8 ev على الترتيب . اشرح فى اطار التركيب الذرى لماذا كانت هذه القيم متوقعة ؟

١٢ - قدّر قيمة طاقة الفوتون القادر على اقتلاع الكترون من أقصى قشرة داخلية لذرة الذهب (ق) .

١٣ - يبلغ قطر النواة حوالى 10^{-15} m . قدّر قيمة الحد الأدنى لكمية تحرك بروتون عليه أن يكون جزءا من النواة . (ق)

مسائل

١* – قذف رذرفود ومساعدوه جسيمات α $(q = +2e)$ نحو ذرات الذهب $(Z = 79)$. وقد كانت ط.ح لبعض الجسيمات هى 4.8 MeV . (أ) ما هى ط.و. (بدلالة r) لجسم α موجود على مسافة r من نواة الذهب ؟ (ب) الى أى حد يمكن لجسيمات α فى تجربة رذرفورد أن تقترب من مركز نواة الذهب ؟ افترض أن نواة الذهب تبقى ساكنة بالضرورة وأهمل تأثير الالكترونات الذرية (البعيدة نسبيا) .

٢* – تبلغ كثافة الذهب $19.3\ g/cm^3$ ووزنة الذرى 197 (أ) ما هو وزن ذرة الذهب ؟ (ب) ما عدد ذرات الذهب فى مساحة قدرها $1\ cm^2$ من غشاء ذهبى سمكه 0.010 cm ؟ (جـ) يبلغ قطر نواة الذهب حوالى 10^{-14} cm بافتراض عدم وجود تراكب ، فما هى المساحة التى يغطيها نوى الذهب من المساحة الكلية $1\ cm^2$ ؟ (د) لو أن رذرفورد استعمل غشاءا بهذا السمك فما هو كسر جسيمات α الذى سيلاحظ أنه أنحرف بشدة ؟

٣ – احسب الطول الموجى (أ) للخط الرابع فى متسلسلة ليمان و (ب) للخط الخامس فى متسلسلة بالمر . (استعمل $R = 1.097 \times 10^7\ m^{-1}$

٤ – تأكد من حد المتسلسلة المعطى لمتسلسلة باشن فى الشكل (٢٧ – ٥) وذلك بحسابه من صيغة متسلسلة باشن استخدم $R = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$

٥ – اعتبر ان $\Delta\lambda$ هو الفرق فى الطول الموجى بين الخط السابع فى متسلسلة بالمر وحد المتسلسلة ما هى النسبة بين $\Delta\lambda$ والطول الموجى لحد المتسلسلة . استخدم $R = 1.097 \times 10^7\ m^{-1}$

٦ – (أ) ما هى صيغة مستويات الطاقة لليثيوم ثنائى التأين والمكتوبة بالشكل الآتى $E_n = -\text{const}/n^2$ eV

(ب) ما هى الطاقة اللازمة (بالالكترون فولت) لازالة آخر الكترون من الليثيوم ثنائى التأين ؟

(حـ) ما هو الطول الموجى لفوتون يقدر بالضبط على اطلاق هذا الألكترون حرا ؟

٧ – افترض أن الكترونا يدور فى مسار دائرى نصف قطره 0.1 nm حول نواة الأيدروجين . (أ) ما هى سرعة الالكترون اذا كانت قوة الجذب المركزى سببها قوى كولوم ؟ (ب) ما هو تردد الالكترون فى المدار ؟ (حـ) ما هو الطول الموجى للأشعاع الناتج عن هذا على أساس النظرية الكلاسيكية .

٨ – افترض أن نظرية بوهر يمكن تطبيقها على الالكترون الداخلى جدا فى ذرة الذهب $(Z = 79)$. وذلك مع اهمال وجود جميع الالكترونات الأخرى (و هذا فى الواقع ليس بالتقريب الردىء) . (أ) أثبت أن الطاقة اللازمة لازالة هذا اللاكترون من الذرة هى $(13.6)(79)^2$ eV (ب) ما هو نصف قطر أول مدار – حسب بوهر – لهذه الذرة ؟

٩ – تتكون قشرة ذرية فرعية من تلك الالكترونات الذرية التى لها نفس قيم n و l وتختلف فى m_l و m_s . كم عدد الالكترونات الموجودة فى القشرة الفرعية $n = 3$ ، $l = 2$ لذرة الذهب ؟

١٠ – كم عدد الالكترونات اللازمة لملأ (أ) القشرة $n = 4$ و (ب) القشرة الفرعية $n = 3$ و $l = 1$ ؟ (أنظر المسألة رقم ٩ لتراجع تعريف القشرة الفرعية) .

١١ – يعجل الشعاع الالكترونى فى أجهزة التليفزيون الملون الحديثة عادة خلال ما يقرب من 20,000 V . ما هو أقصر طول موجى لأشعة x المتولدة بشعاع معجّل بهذه القيمة 20,000 V حين يصطدم بنهاية أنبوبة التليفزيون ؟ لم تكن بعض الأجهزة القديمة للتليفزيون على درجة كافية من الوقاية ولذا كانت تتسرب منها كميات محسوسة من أشعة x .

١٢** – يسطع شعاع من أشعة γ طولها الموجى 0.5A° على ذرات من غاز الأيدروجين ويقوم باقتلاع الكترونات (الكترونات كهرضوئية) من ذرات الأيدروجين .

(أ) ما هى طاقة الالكترونات المقتلعة ؟ (ب) وما هى سرعتها ؟

١٣* – يمكن تشغيل أنبوبة عادية لأشعة – x بجهد قدره 30,000 V وتيار قدره 10 mA بقذف اللوح . (أ) ما هى كمية الحرارة الناتجة فى اللوح فى الثانية نتيجة هذا القذف ؟ (ب) لو كانت الحرارة النوعية هى 0.1 cal /g للوح المعدنى الذى وزنة 200 g ، فما هو الارتفاع الناتج فى درجة الحرارة فى زمن قدره 1 min اذا لم تفقد أية حرارة ؟

١٤* – يستخدم فى بعض أنابيب أشعة x ذات الطاقة العالية جدا ، ماء يسرى خلال باطن اللوح المعدنى لتبريده . افترض أن أنبوبة معينة تعمل عند تيار قدره 30 mA و200,000V .ما هى درجة تسخين ماء التبريد اذا كان معدل السريان هو 1litre/min ؟

١٥* – يقذف غاز الأيدروجين عند درجة حرارة الغرفة بشعاع من الالكترونات التى سبق تعجيلها خلال فرق للجهد قده 12.9 v ما هو الطول الموجى للضوء الذى يبعثه الغاز نتيجة لهذا القذف ؟

١٦ – يبلغ حد المتسلسلة فى حالة متسلسلة معينة لأشعة X فى النحاس حوالى 1.3A° . ما هى الطاقة اللازمة لاقتلاع الالكترون من الذرة عندما يكون الالكترون فى أدنى مستويات الطاقة لهذه المتسلسلة ؟

١٧ – (أ) عين باستخدام البيانات الواردة فى الشكل (٢٧ – ١٦)فرق الطاقة بين المستويين $n = 2$ و $n' = 3$ للموليبدنم . (ب) لو أنك أردت تشييد الرسم البيانى لمستويات الطاقة لهذه الذرة ما هى البيانات الاضافية اللازمة لذلك ؟

١٨ – قد تستغرق ذرة ما زمنا قدره 10^{-9} s لتبعث فوتونا . افترض أن الذرة تبعث نبضة موجية خلال هذا الزمن بحيث كان الطرف الأمامى للنبضة قد ابتعث مبكرا بمقدار 10^{-9} s عن الطرف الخلفى لها ولو أن الطول الموجى للموجة كان 500 nm فما هو طول الفوتون مقدرا بالأطوال الموجية ؟

١٩** – يكون شعاعا ليزر مختلفين متماسكين لو أن كل ليزر يبعث نفس الأطوال الموجية تماما . وحتى لو كان هناك اختلاف طفيف فى الأطوال الموجية فان الشعاعين سيظهران أثر التداخل . وعندما يوصل الشعاعان معا فانهما يعطيان شعاعا هو المحصلة ويتذبذب مع الزمن جيئة وذهابا من الاضاءة الى الظلمة . وهذا شبيه بظاهرة الخفقان التى نوقشت فى الفصل الخامس عشر للموجات الصوتية . لو أن الطول الموجى لأحد الشعاعين كان 600nm تماما فكم يكون الطول الموجى للآخر حتى يمكن انتاج أقصى اضاءة مرة كل ثانية ؟ (قد تريد أن تستخدم حقيقة أنه عندما $x \ll 1$ فان $1/(1 \pm x) \approx 1 \mp x$

الفصل الثامن والعشرون

النواة الذرية

لقد أوضحت تجربة رذرفورد – كما رأينا فى الفصل السابق – أن النواة الذرية هى كيان صغير جدا فى مركز الذرة يتركز داخله كل الشحنة الموجبة للذرة وكذلك معظم كتلتها . أما فى هذا الفصل فسنتقصى تفاصيل النواة وسنتعرف كذلك على بعض خواص أخرى للنواة مثل النشاط الاشعاعى والانشطار والاندماج . كما سنقدم أيضا عددا من التطبيقات المختلفة للفيزياء النووية .

٢٨ - ١ تركيب النواة

رأينا فى الفصل السابق كيف استطاع رذرفورد أن يستدل على تركيب الذرة من نتائج تجارب الاستطارة . ومنذ ذلك الحين كان النموذج النووى للذرة يلقى كثيرا من التأكيدات بطرق عديدة . ومن ثم صار تصورنا للذرة كمايلى : نواة دقيقة عند مركز الذرة يوجد عندها كل الشحنة الموجبة للذرة كما يوجد بها أكثر من 99.9 فى المائة من كتلتها . أما الذرة نفسها فنصف قطرها أكبر بحوالى 10^5 مرة من نصف قطر النواة . أما الالكترونات فتوجد فى الجزء الخارجى للذرة . وقد تمت فى الفصل السابق مناقشة سلوك الالكترونات والآن ننتقل إلى مناقشة النواة الذرية .

تتكون النواة من نيوترونات (n) وبروتونات (p) . وكما تعلمنا من قبل فالبروتون هو ببساطة نواة ذرة الايدروجين وشحنته $+e$ وتساوى 1.602×10^{-19} C وكتلته هى 1.673×10^{-27} kg . أما النيوترون فلا شحنة له وكتلته هى 1.675×10^{-27} kg . سنقوم كثيرا باستخدام وحدة للكتلة أسهل تداولا تسمى وحدةالكتلة الذرية u وسنعرف فيما بعد التعريف الدقيق لها . تبلغ كتلة البروتون 1.007 u أما كتلة النيوترون فهى 1.009 u وفى كثير من الأغراض سنقرب هذه الكتل إلى الواحد الصحيح .

حيث أن شحنة النواة هى Ze لعنصر عدده الذرى Z ، لذا نجد أن هناك Z بروتون فى النواة . وهذه البروتونات تقدم Z وحدة للكتلة (بوحدات الكتلة الذرية) إلى النواة على أن الكتلة M لأية نواة تربو على Z لجميع العناصر فيما عد الايدروجين ، ويعزى هذا الفرق فى الكتلة إلى النيوترونات التى بالنواة . ويشار إلى النيوترونات والبروتونات الموجودة بالنواة على أنها **نويات** ، ويسمى العدد الكلى للنويات داخل النواة **بعدد الكتلة الذرية** للعنصر مثار السؤال ويمثل بالرمز A . ولما كانت كتل البروتون والنيوترون قريبة من الواحد الصحيح (1 u) فإن قيمة A ستكون قريبة من كتلة النواة مقاسة بوحدات الكتلة الذرية .

العدد الكتلى A

يمكن قياس حجم النواة عن طريق قذفها بجسيمات ذات طاقة عالية . وقد بينت هذه القياسات أنه يمكن اعتبار النواة كرة بشىء من التقدير التقريبى ويكون نصف قطرها R معطى بالعلاقة .

نصف قطر النواة

$$R = (1.2 \times 10^{-15})(A^{1/3}) \quad \text{m}$$

ومن المنطقى أن يتغير نصف القطر النووى مع $A^{1/3}$ وذلك لأن كتلة النواة تتناسب مع الكتلة الذرية للعنصر ، فإذا افترضنا أن نويات كافة العناصر لها نفس الكثافة ρ فإن ،

$$(\tfrac{4}{3}\pi R^3)\rho = \text{الكتلة} \propto A$$

ومن هنا نجد أن ،

$$R \propto A^{1/3}$$

وتغير R بهذه الطريقة – على الأقل بالنسبة للنوى الكبير ، يدل على أن نوى العناصر له نفس الكثافة .

لنعد الآن إلى أبسط الذرات على الاطلاق وهو الايدروجين . لقد أشرنا إلى أن عدده الكتلى واحد صحيح ، وأن نواته هى ببساطة البروتون . ولدواعى السهولة سنستخدم عادة الوحدات الذرية للتعبير عن الكتل الذرية ، وتعبر عن الشحنات على أنها مضاعفات لكم الشحنة $+e$. ومن ثم تكون كتلة نواة الايدروجين هى وحدة الكتل وشحنتها وحدة الشحنات .

الذرة التى تلى الايدروجين فى الجدول الدورى * ، وهى للعنصر التالى فى الثقل وهو الهليوم . للهليوم الكترونان خارج نواته وهو غاز خامل كيميائيا . وحيث أن شحنة النواة يجب أن تتوازن تماما مع الشحنة الالكترونية ، لذا فنواة الهليوم يجب أن تحمل شحنة مقدارها 2 + . يشير مطياف الكتلة (سيناقش فى القسم القادم) إلى أن كتلة نواة الهليوم قريبة جدا من 4 u ، أى أن نوى الهليوم يجب أن يحتوى على بروتونين ليتم توفير الشحنة 2 + على كل نواة . أما الوحدتان الأخريان لكتلة النواة فمردهما إلى النيوترونين المكونين لباقى النواة . ومن ثم ، نجد أن وحدتى الشحنه الموجبه وأثنتين من الوحدات الاربعة للكتلة فى نواة الهليوم قد أسهم بهم البروتونان أما وحدتا الكتلة المتبقيتان فهما نتيجة للنيوترونين .

كلما تقدمنا فى الجدول الدورى سوف نرى أن كل النوى يمكن أن ينظر اليه على أنه مكون من بروتونات ونيوترونات ، والمصطلحات التالية تستخدم كطريقة مختزلة لوصف النواة ، فتوصف نواة عنصر ما ، X مثلا بالرموز التالية

رمز النواة

$$^{\text{الكتلة}}_{\text{الشحنة}}\text{X} \quad \text{أو} \quad ^{A}_{Z}\text{X}$$

* أنظر الملاحق ٣ و ٤ للجدول الدورى ولجدول النظائر .

ومعنى هذا أن الايدروجين سيرمز اليه بالرمز $^{1}_{1}H$ والهليوم $^{4}_{2}He$.والذى يحدد الشحنة هو نفسه العدد الذرى Z لأنه كما تذكر من الكيمياء ترتب الذرات فى الجدول الدورى بدلالة عدد الالكترونات التى فى الذرة .

سنختار الآن اليورانيوم كمثال على عنصر ثقيل من الجدول الدورى . كل ذرة من ذرات اليورانيوم تحمل نواتها شحنة مقدارها 92 . ولذا يرتب اليورانيوم فى الجدول الدورى على أنه العنصر رقم 92 . (لاحظ أن طبيعة العنصر تحددها فاعليته الكيميائية وهذه بدورها تتحدد بالتركيب الالكترونى لذرته . ومن ثم يعنى الكيميائى بالشحنة التى على النواة فقط لأنها هى التى تحدد عدد الالكترونات المتاحة للذرة فى التفاعلات الكيميائية) وكما سنرى فى القسم القادم ليست كل النوى لعنصر ما بنفس الكتلة . ومع هذا فلنعتبر اليورانيوم 238 ، حيث لنواة اليورانيوم كتلة مقدارها 238 u وعلينا أن نرمز لهذه النواة بالرمز $^{238}_{92}U$.

يجب أن يكون واضحا من هذا الرمز أن النواة تحوى 92 بروتونا توفر شحنة قدرها 92+ كما توفر 92 وحدة كتلة من المجموع الكلى وهو 238 وحدة . أما المتبقى وهو 146 = 92 - 238 وحدة كتلة فتوفرها النيوترونات ، ومن ثم فنواة $^{238}_{92}U$ تحتوى على 92 بروتونا و 146 نيوترونا .

٢٨ - ٢ النظائر

لقد فكر الباحثون الأوائل فى أن الكتل النووية يجب أن تكون مضاعفات صحيحة لكتلة الايدروجين ، ولكن بمرور الزمن أشارت القياسات الدقيقة للكتل الذرية أن هذا ليس صحيحا ، وعلينا أن نفهم أن الكتلة الذرية (وهى تقريبا الكتلة النووية ، لأن كتلة الالكترونات صغيرة جدا) قد تم تعيينها أولا على يد الكيميائيين . فلو اتحد 1 g من الايدروجين ، مثلا ، مع 35 g من الكلور لكى يكونا 36 g من كلوريد الايدروجين ، HCl ، لدعا ذلك الكيميائى إلى التفكير بأن ذرة الكلور ذات كتلة أكبر 35 مرة قدر ذرة الايدروجين . ومن ثم تعين الكتل الذرية فى الجدول الدورى بهذه الطريقة فى أغلب الأحوال . (اختار الكيميائيون ، فى الواقع ، الأوكسجين – لعدة سنوات – لكى تكون كتلته 16 u تماما وبنوا على هذا الأساس كتل كل العناصر الأخرى . وقد أصبح من المتفق عليه الآن بناء كل الكتل على عنصر قياسى آخر وهو ^{12}C . وفى هذا **النظام الموحد** تكون كتلة ذرة ^{12}C بما فى ذلك الالكترونات هى – حسب التعريف – مساوية $12\,u$ تماما . وقد اتضح أن $1\,u = 1.6606 \times 10^{-27}$ kg وتبلغ كتلة البروتون فى هذا النظام للوحدات 1.0073 u) .

وحدة الكتل الذرية

على أنه حين صارت القياسات أكثر دقة ، صار من الواضح أن الكتل الذرية ليست مضاعفات صحيحة لكتلة الايدروجين . فكتلة الكلور على سبيل المثال 35.5 u وهى بعيدة عن كونها عددا صحيحا . وعلى الرغم من أن العناصر ذات الاعداد الذرية المنخفضة تكون كتلها أقرب ماتكون إلى الاعداد الصحيحة الا أنه حتى البورون وهو العنصر رقم 5 تبلغ كتلته الذرية 10.8 u وهى ليست بالتأكيد عددا صحيحا من كتل البروتونات والنيوترونات . وقد سبب هذا الأمر قدرا كبيرا من الصعوبة فى تفسير التركيب النووى ولم يتيسر حل هذه الصعوبة الا باكتشاف مطياف الكتلة .

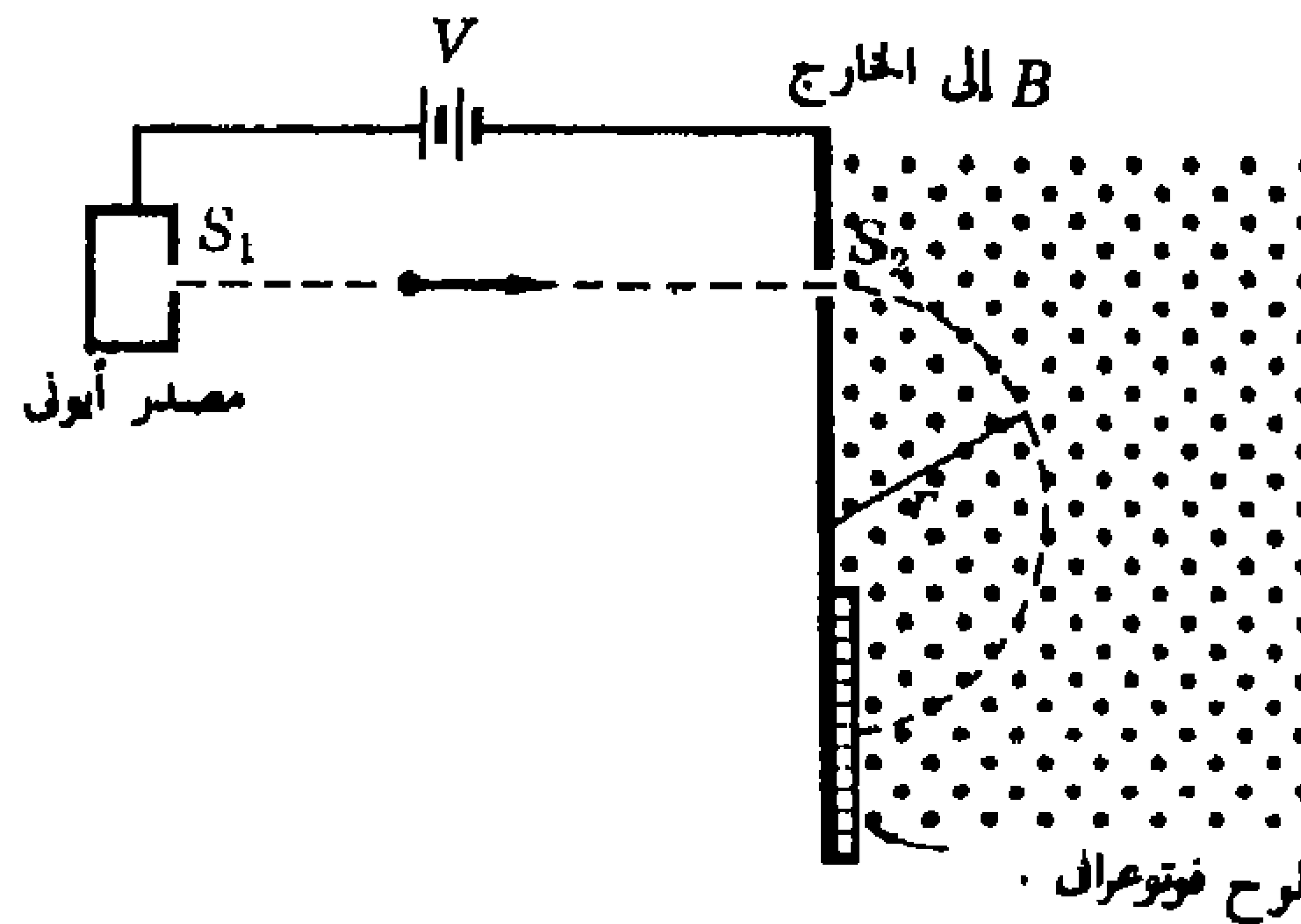
مطياف الكتلة

يتركب مطياف الكتلة كما فى الشكل (٢٨ – ١) . تؤين الذرات فى مصدر أيونى . وعندما يشرد أيون موجب من خلال الشق S_1 فإنه ينجذب نحو اللوح السالب والشق S_2 . فلو كان أيونا وحيد الشحنة فإن شحنته تكون $+e$ وعند بلوغ الشق S_2 تكون طاقة حركته Ve ، حيث V هو فرق الجهد الذى ينحدر خلاله الأيون ، ومن ثم يكون لدينا

$$\tfrac{1}{2}mv^2 = Ve \qquad (٢٨ - ١)$$

عندما يمر الأيون خلال الشق 2 ، فإنه يلج فى مجال مغناطيسى عمودى على الصفحة . ينحرف الأيون فى مسار دائرى ، كما هو مبين . ويمكن ايجاد نصف قطر المسار – كماسبق وناقشنا فى الفصل التاسع عشر – من حقيقة أن القوى الجاذبة المركزية تتوفر من القوة المغناطيسية المؤثرة على الأيون ،

$$Bev = \frac{mv^2}{r} \qquad (٢٨ - ٢)$$

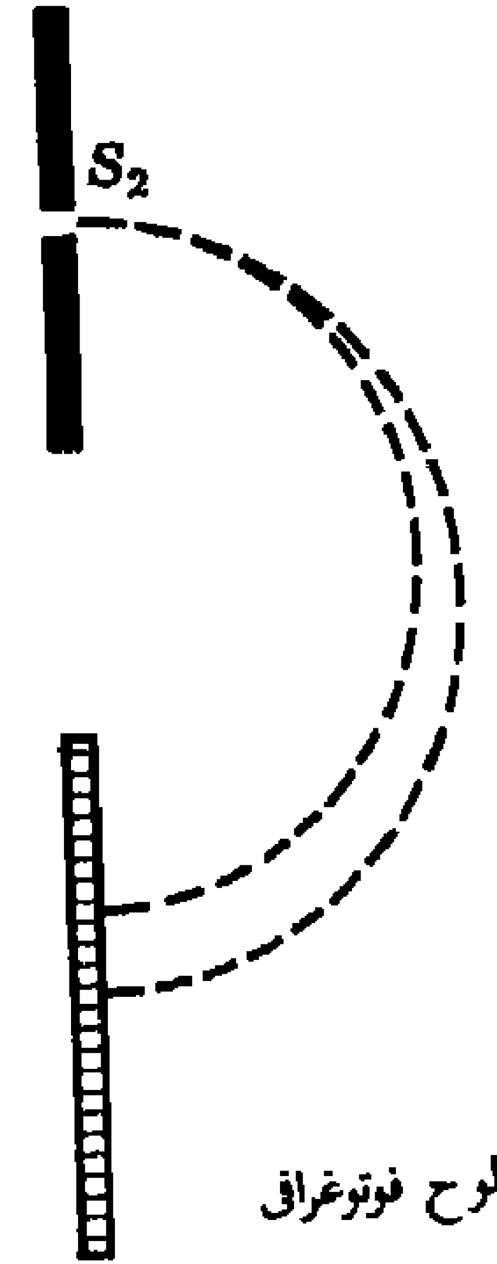


شكل (٢٨ – ١)
تنحرف الأيونات الموجبة فى مطياف الكتلة بواسطة المجال المغناطيسى

بالتعويض من المعادلة (٢٨ – ١) فى (٢٨ – ٢) نصل إلى التعبير التالى لنصف قطر المسار الدائرى .

$$r = \sqrt{\frac{2Vm}{B^2e}} \qquad (٢٨ - ٣)$$

وحيث أن الأيون سيتم اكتشافه بواسطة اللوح الفوتوغرافى المبين فى الشكل (٢٨ – ١) ، لذا يمكن قياس r ، ومن الطبيعى أن قيم كل من V ، B ، e معروفة ، ومن ثم يمكن ايجاد كتلة الأيون . وتستخدم معظم المطاييف الحديثة كشافا الكترونيا بدلا من اللوح الفوتوغرافى .



شكل (٢٨ – ٢)
يسلك النظيران المختلفان للكلور مسارات مختلفة فى مطياف الكتلة كما هو مبين هنا (بشىء من المبالغة) .

حين بدأ تشغيل مطياف الكتلة ، ظهر اكتشاف طريف جدا ، فقد وجد أن عددا من العناصر التى على درجة عالية من النقاء تبدو كما لو كانت مكونة من عدة فصائل تتفق جميعا فى نفس الخواص الكيمائية . فالكلور النقى ، مثلا ، وجد أنه يتكون من نوعين من الأيونات ، إذ وجد شعاعان أيونيان منفصلان فى مطياف الكتلة كما هو موضح فى الشكل (٢٨ – ٢) وبالتعويض عن قيم أنصاف الأقطار فى المعادلة (٢٨ – ٣) أمكن حساب كتلتى النوعين . وبالاضافة إلى ذلك استخدمت درجة سطوع الصورة على اللوح الفوتوغرافى لتحديد الكثرة النسبية للنوعين .

	النوع ١	النوع ٢
الكتلة u	35.0	37.0
الكثرة النسبية	0.754	0.246

إذا ما أخذنا متوسط كتلة هاتين الفصيلتين (وذلك بضرب كل كتلة فى الكثرة النسبية المناظرة ثم الجمع) ، فإننا نحصل على متوسط للكتلة مقداره 35.5 u ، وهذا هو بالضبط المقدار الذى عينه الكيميائيون لكتلة الكلور . نستنتج من هذا أن الكتل الذرية المدرجة فى الجدول الدورى هى متوسطات كتل الفصائل المنفردة .

من هنا نجد أن الكتل التى تعين بواسطة مطياف الكتلة للفصائل المنفردة تكون بالضرورة أعدادا صحيحة . وقد ثبتت صحة هذا الأمر لكلّ العناصر التى فحصت بهذه الطريقة . وحيث أننا نعلم أن كل أنواع الكلور لها شحنة نووية مقدارها 17 (لأن العدد الذرى للكلور هو 17) لذا وجب أن تحتوى نواة الكلور على 17 بروتونا ، ونستنتج من ثم أن نواة الفصيلة 1 المذكورة تحتوى على (35-17=18) نيوترونا أما الفصيلة 2 فتحتوى على 20 نيوترونا . يسمى النوى الخاص بنفس العنصر والذى يحتوى على اعداد مختلفة من النيوترونات **نظائر العنصر** . وفى اطار هذا المصطلح يحتوى الكلور الموجود فى الطبيعة على نظيرين يسميان $^{35}_{17}Cl$ و $^{37}_{17}Cl$.

تتصرف جميع النظائر لعنصر ما بنفس الطريقة فى التفاعلات الكيميائية . وهذا راجع إلى حقيقة أن جميع النظائر لها نفس الشحنة النووية ، وتبعا لذلك نفس العدد من الالكترونات فى ذراتها . والكتلة الذرية لكل نظير قريبة جدا من عدد صحيح ، لأن نواته مبنية من نيوترونات وبروتونات لكل منها وحدة الكتل . ومعظم العناصر الموجودة فى الطبيعة هى خليط من نظائر مختلفة وهذه المخاليط هى التى تستخدم عادة فى التفاعلات الكيميائية العادية . أما الكتل الذرية المعينة كيميائيا للعناصر التى فى الجدول الدورى فهى ليست أعدادا صحيحة لأنها متوسط الكتل النظائرية الموجودة فى الطبيعة . وستجد فى الملحق رقم ٤ قائمة مختصرة للنظائر الموجودة فى الطبيعة .

٢٨ – ٣ النقص الكتلى وطاقة الترابط

باختراع مطاييف الكتلة ذات الحساسية الفائقة أمكن تعيين كتل النوى بدقة كبيرة . وقد وفرت هذه النتائج الدقيقة للغاية تأييدا مذهلا لمفهوم أينشتين عن تبادل الكتلة – الطاقة . فقد بينت هذه القياسات بالفعل ، امكانية استخدام الطاقة النووية وهى مصدر للطاقة لم يكن من قبل موضع مجرد الشك . ويمكننا معرفة قيمة المبدأ المتضمن بفحص موقف محدد .

لندرس حالة بسيطة وذلك بتحليل بيانات الكتلة لنواة الهليوم . يجب أن تتكون كتلتها الكلية من كتلة بروتونين زائد كتلة نيوترونين ،

$$2n = 2.01734 \text{ u}$$
$$2p = 2.01456$$

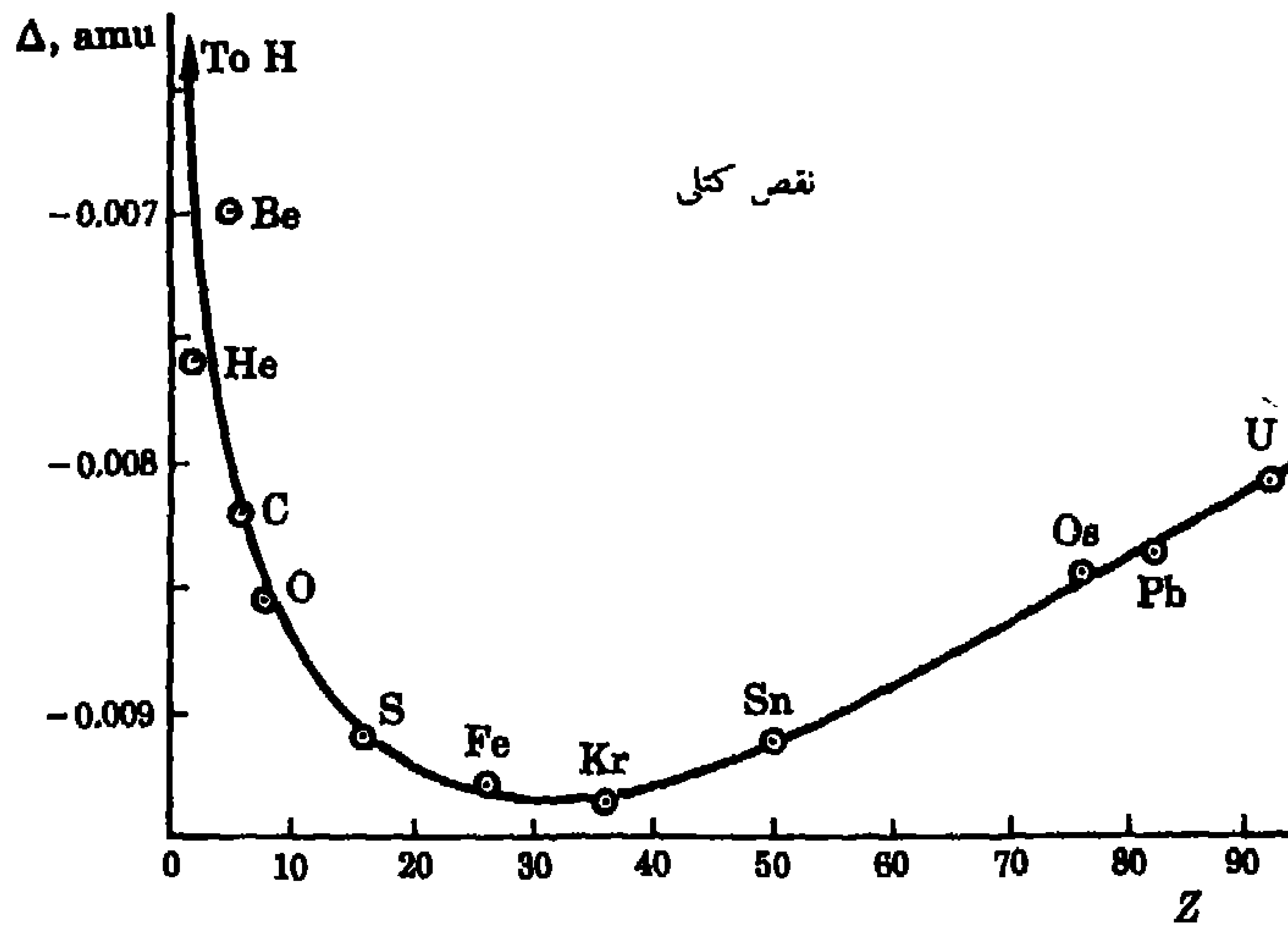
كتلة He المحسوبة = 4.03190 .

كتلة He المقاسة = 4.00150 .

الفرق فى الكتلة = 0.03040 u .

من الواضح أنه لايوجد اتفاق بين الكتلة المقاسة والكتلة المحسوبة . وأن الاختلاف وهو 0.030 u أكبر من أن يعزى إلى الخطأ التجريبى . فأين إذن يذهب هذا الفائض من الكتلة حين تتحد البروتونات والنيوترونات لتكوين النواة ؟ هذا ماسنحاول الآن بحثه .

وهذا الاختلاف فى حالة الهليوم ليس هو الوحيد ، إذا تحدث اختلافات مشابهة للنوى المختلفة كذلك كما يصور الشكل (٢٨ - ٣) ، حيث يبدو الرسم البيانى بين تغير الكتلة لكل نوية $\Delta M/A = (M - M_{np})/A$ والعدد الذرى . ونعنى بتغير الكتلة لكل نوية الكتلة النووية الحقيقية M مطروحا منها مجموع كتل البروتونات والنيوترونات M_{np}، وقسمة الناتج على العدد الكلى للنيوترونات والبروتونات A . ومن الطبيعى أن ΔM تكون صفرا فى حالة الايدروجين وهى تقع خارج حدود المنحنى من أعلا فى الشكل ٢٨ - ٣ .



شكل (٢٨ - ٣)
اختلاف الكتلة لكل نوية للنوى القريب من منتصف الجدول الدورى يكون أكبر من ذلك الذى للعناصر الواقعة عند طرفى الجدول الدورى .

أننا نعلم طريقة واحدة فقط يمكن أن تفقد بها الكتلة فى موقف كهذا . لقد وجدنا فى الفصل السادس والعشرين أن الكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة وأن العلاقة بينهما هى ،

الطاقة $= \Delta m\, c^2$ (٢٨ - ٤)

حيث Δm هى الكتلة المفقودة و c سرعة الضوء 3×10^8 m/s .ويتضح من ثم أنه عندما يتحد النيوترونان والبروتونان لتكوين نواة الهليوم فإن قدرا من الطاقة يجب أن يخرج . وهذا القدر من الطاقة يرتبط مع فقد الكتلة بالمعادلة (٢٨ - ٤) .

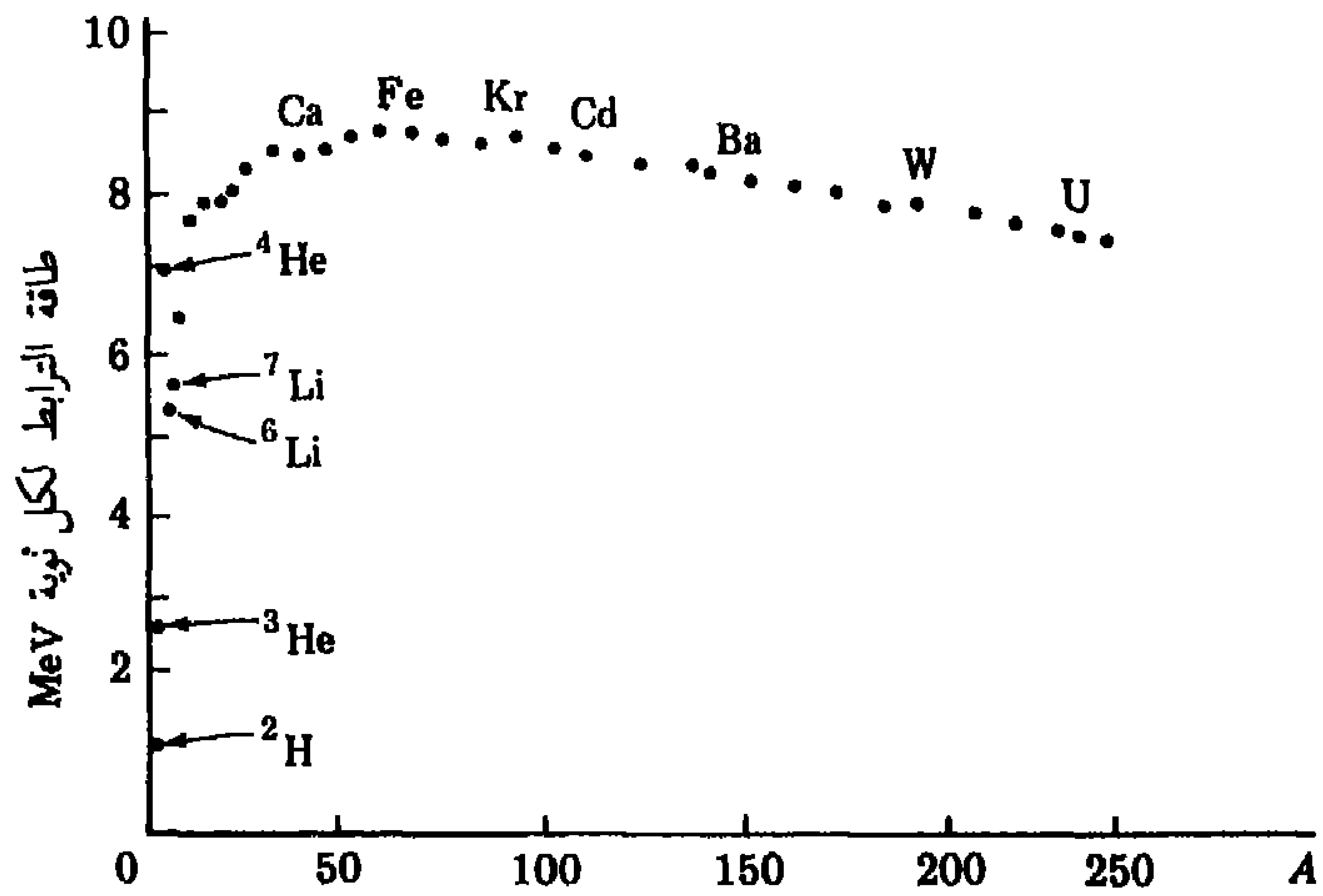
يتضح من الشكل (٢٨ - ٣) أن كل النوى له كتلة أقل من مجموع كتل البروتونات والنيوترونات التى اتحدت لتكون ذلك النوى . وقد فقدت كمية من الكتلة

وظهرت كمية من الطاقة عندما تكونت النوى . ويعنى هذا أيضا ، أن طاقة معينة تلزم لفصل النويات بعيدا عن بعضها البعض . لأنه فى تلك الحالة ستحتاج إلى كتلة حديدة تخلق أثناء العملية . والطاقة اللازمة لتفتت النواة إلى مكوناتها فى النويات المنفصلة تسمى **طاقة ترابط** النواة .

تعريف

يمكننا حساب طاقة الترابط لكل نوية من بيانات الشكل (٢٨ - ٣) مباشرة . فمقد الكتلة لكل نوية والناشيء عن تكوين نواة البريليوم Be هو 0.007u . وهذا يكافىء طاقة مفقودة قدرها (من المعادلة ، الطاقة = $\Delta m c^2$) 6.5 MeV . ومن ثم تكون طاقة الترابط لكل نوية فى حالة نواة البريليوم هى 6.5Mev . فإذا ضربنا هذا القدر من الطاقة فى عدد النويات الموجودة فى نواة البريليوم Be لنتجت كمية من الطاقة اللازمة لتفتيت النواة تماما . نوضح فى الشكل ٢٨ - ٤ رسما بيانيا لطاقة الترابط لكل نوية فى حالة عناصر نموذجية . لاحظ أن كبر طاقة الترابط لكل نوية يعنى نواة مستقرة جدا وسنرجع إلى هذا الموضوع حين نناقش القدرة النووية .

طاقة الترابط وعلاقتها بالاستقرار



شكل (٢٨ - ٤)
طاقة الترابط لكل نوية فى حالة عناصر نموذجية . لاحظ الاستقرار العالى فى حالة ^{4}He

مثال توضيحى ٢٨ - ١ ما مقدار الطاقة المنبعثة عندما تتكون نواة هليوم واحدة من النيوترونات والبروتونات ؟

طريقة الحل لقد وجدنا فى القسم السابق أن الكتلة المفقودة فى هذه العملية هى 0.030 u وحيث أن كتلة البروتون 1.007u أو 1.67×10^{-27}kg ، فإنه يصبح لدينا معامل التحويل ، $1u = 1.66 \times 10^{-27}$kg ومن ثم تكون الكتلة المفقودة عند تكوين نواة هليوم واحدة هى 5.0×10^{-29}kg . وباستخدام المعادلة (٢٨ - ٤) نجد أن ،

$$\text{الطاقة} = (5.0 \times 10^{-29}\ kg)(9 \times 10^{16}\ m^2/s^2)$$

$$28.2\ MeV = 2.82 \times 10^7\ eV = 4.5 \times 10^{-12}\ J$$

من المناسب ملاحظة أن فقد كتلة مقدارها 0.03u يؤدى إلى 28.2Mev من الطاقة .

$$1\ u \rightarrow 931\ MeV = 1.49 \times 10^{-10}\ J$$

نلاحظ أيضا أنه حيث أن 4g من الهليوم تحتوى على 6×10^{23} نواة فإن الطاقة المحررة عند تكوين 4g من الهليوم هى

$$(6 \times 10^{23})(4.5 \times 10^{-12}\ J) = 2.7 \times 10^{12}\ J$$

وهذه كمية هائلة من الطاقة ، وللمقارنة فإن الشغل المبذول فى رفع رجل وزنه 100kg لمسافة 100m هو حوالى $10^4 J$ فقط . أما الطاقة المحررة عند تكوين 4g من نوى الهليوم من بروتونات ونيوترونات فكافية لرفع 200 مليون من الاشخاص ذوى 100kg وزنا خلال مسافة تزيد على 100m .

٢٨ - ٤ النشاط الاشعاعى

هناك بعض العناصر الموجودة فى الطبيعة وليست مستقرة وانما تنحل ببطء عن طريق التخلص من جزء من نواتها . وهذه العناصر يقال أنها **مشعة** .
وقد كان أول اكتشاف لعنصر مشع على يد هنرى بيكريل عام ١٨٩٦ عندما وجد أن ذرات اليورانيوم $(Z=92)$ تصدر اشعاعات تغبش الافلام والالواح الفوتوغرافية . ونجح بعد ذلك بعامين كل من مارى وبيير كورى فى فصل عنصرين مشعين جديدين كيميائيا وهما البولونيوم $(Z=84)$ والراديوم $(Z=88)$. ومنذ ذلك الحين وجد أن كل العناصر التى يزيد عددها الذرى عن 83 تعتبر إلى حد ما مشعة .
هناك الكثير من العناصر المشعة التى صنعها الانسان . فالمفاعلات النووية ، بشكل خاص ، تنتج كميات وافرة من النوى الذى لا يمكن وجوده بكميات محسوسة فى أى مكان آخر على الأرض . وهذا النوى غير مستقر بدرجة كبيرة وتطرأ عليه تغييرات مشعة سريعة . وربما تكون هذه العناصر قد وجدت مبكرا على ظهر الأرض ثم تحللت منذ زمن بعيد .

وبغض النظر عن مصدر أو عمر المواد المشعة ، فكلها تتحلل (أو تنحل) حسب نفس القانون الرياضى . وهذا القانون يصاغ بدلالة N ، عدد

النوى الذى لم يتحلل بعد و ΔN وهو عدد النوى التى انحلت فى فترة زمنية هى Δt . تبين التجربة أن ،

قانون الانحلال

$$\Delta N = \lambda N \Delta t \quad (٢٨ - ٥)$$

حيث λ مقدار ثابت بالنسبة لمادة معينة ويسمى ثابت الانحلال . وبما أن المعادلة (٢٨ — ٥) يمكن اعادة كتابتها على الصورة $\lambda = (\Delta N/N)/\Delta t$ فإن ثابت الانحلال يصبح ذا معنى بسيط . **ثابت الانحلال λ هو ذلك الكسر من النوى الذى ينحل فى وحدة الزمن .**

تعريف

وحيث أن λ ثابت بالنسبة لمادة معينة ، نجد أن الكسر الذى ينحل فى وحدة الزمن يكون دائما نفس المقدار ، فعلى سبيل المثال λ للراديوم هى $0.000428\ yr^{-1}$ وهذا يدل على أنه فى أية عينة من الراديوم — بغض النظر عن تاريخها — فإن كسراً مقداره 0.000428 منها سوف ينحل فى السنة التالية . نوضح فى الشكل (٢٨ — ٥) رسما بيانيا بين عدد النوى التى لم تنحل بعد والزمن . وواضح أن المنحنى منحنى انحلال أسى .

تعريف

توصف المواد المشعة عادة بدلالة عمر النصف لها . **وعمر النصف لمادة ما هو الزمن الذى يستغرقه نصف المادة فى الانحلال .** راجع الشكل (٢٨ — ٥) حيث يشار إلى **عمر النصف** . ويمكن رياضيا اثبات أن عمر النصف مرتبط بثابت الانحلال على النحو التالى :

عمر النصف

$$\text{عمر النصف} = \frac{0.693}{\text{ثابت الانحلال}} \quad (٢٨ - ٦)$$

وفى حالة الراديوم $\lambda = 0.000428\ yr^{-1}$ بالتعويض بهذه القيمة فى المعادلة (٢٨ — ٦) نجد أن عمر النصف للراديوم يساوى 1620 yr . ومن هذا يتبين أن نصف الراديوم سيتبقى كما هو أى راديوم بعد مرور فترة زمنية 1620 yr حتى وإن كانت عينة الراديوم مغلقة داخل أنبوبة ملحومة . أما النصف الثانى فسينحل إلى نوى من نوع آخر . وبغض النظر عن الزمن الذى نبدأ فيه عملية التوقيت فإنه بعد مرور نصف عمر واحد يتبقى نصف المادة الأصلية فقط بدون تغيير .

وللمواد المشعة التى توجد فى الطبيعة أو التى تخلق اصطناعيا مدى عريض من أنصاف العمر . يبلغ نصف العمر (لليورانيوم 328) ^{238}U حوالى $4.5 \times 10^9 yr$ وهذا هو تقريبا نفس عمر الكرة الأرضية . ونستنتج من هذا أن هذا

النظير لا يزال موجودا على ظهر الأرض لأن نصف الكمية الأصلية فقط هو الذى انحل . أما الراديوم فعمر النصف له 1620yr فقط . وكان يجب أن ينحل منذ زمن بعيد ولا يتبقى منه إلا كميات أصغر من أن تقاس . ولكن – كما سنرى – ينتج مزيد من الراديوم الجديد بشكل مستمر فى الطبيعة . هناك نظائر أخرى تنتج فى المفاعلات النووية لا تتعدى أنصاف أعمارها كسرا صغيرا من الثانية ولو أنها وجدت على الأرض منذ البداية لما بقى منها للآن بعد الانحلال – سوى كميات مهملة تماما .

مثال توضيحى ٢٨ – ٢ يصنع اليود 131 وهو نظير مشع فى المفاعلات النووية وذلك للاغراض الطبية . ويتركز هذا النظير فى الغدة الدرقية حين يدخل إلى الجسم . وهناك يعمل كمصدر للإشعاع يستخدم لعلاج تضخم الغدة الدرقية . يبلغ عمر النصف له 8 أيام . افترض أن المستشفى قد طلب 20mg من ^{131}I وقام بتخزينها لمدة 48 يوما . فكم من ^{131}I الأصلى سيبقى بعد هذه المدة ؟

طريقة الحل تنحل كمية اليود إلى النصف كلما مرت 8 أيام . ويمكننا على هذا عمل الجدول التالى

الزمن باليوم	اليود الموجود mg	الزمن باليوم	اليود الموجود mg
8	10	32	1.25
16	5	40	0.625
24	2.5	48	0.312

أى أنه بعد 48 يوما لا يتبقى سوى 0.312g من كمية اليود الأصلية وهى 20mg

وحدة الكورى

مثال توضيحى ٢٨ – ٣ : تسمى كمية المادة التى يحدث بها 3.70×10^{10} تفتتا فى الثانية الواحدة كورى (Ci) من المادة ، أما 10^{-6} Ci فهى ميكروكورى (u Ci) وهى الوحدة الاكثر شيوعا . ماهو كسر الكورى الموجود فى 1 g من الراديوم ؟ نصف العمر للراديوم 1620 yr أو 5.1×10^{10} S .

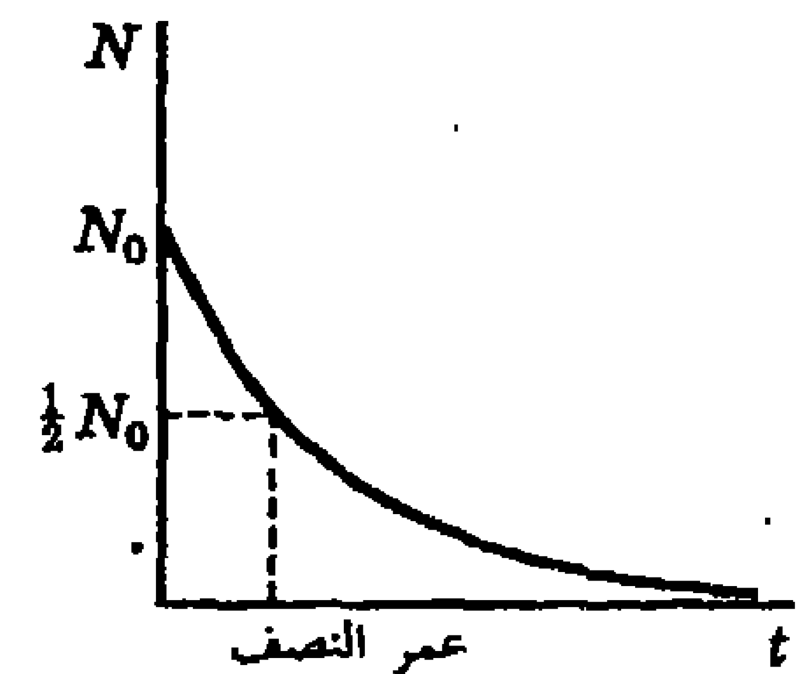
طريقة الحل عدد الذرات المنحلة فى زمن قدره Δt هو :

$$\Delta N = \lambda N \Delta t$$

وحيث أن عدد أفوجادرو من الذرات موجود فى كتلة ذرية واحدة من الراديوم وهى 226kg ، لذا يكون عدد الذرات N فى 1kg هو ،

$$\frac{6\times10^{26}\text{ atoms}}{226\text{ kg}} = 2.66\times10^{24}\text{ atoms/kg}$$

شكل (٢٨ – ٥)
ينحل العنصر المشع أسيا . وعمر النصف هو الزمن الذى يستغرقه نصف النوى فى الانحلال .



ولازلنا فى حاجة لايجاد λ . ويمكن عمل هذا باستخدام المعادلة (٢٨ - ٦) ، لدينا ،

$$\lambda(5.1 \times 10^{10}\ s) = 0.693 \quad \text{أو} \quad \lambda = 1.36 \times 10^{-11}\ s^{-1}$$

وبوضع هذه القيمة فى التعبير الأول لـ ΔN نجد أن

$$\Delta N = (1.36 \times 10^{-11}\ s^{-1})(2.66 \times 10^{21}\ \text{atoms/g})\ \Delta t$$

$$= 3.6 \times 10^{10}\ \Delta t \qquad \text{atoms/g}$$

وذلك حين يعبر عن Δt بالثوانى . ويكون عدد التفتتات فى الثانية فى 1g من الراديوم هو 3.6×10^{10} ولما كان 1Ci من المادة قد عرف على أنه 3.7×10^{10} تفتتا فى الثانية الواحدة ، فإن 1g من الراديوم سيكافىء 3.6/3.7 أو 0.97Ci . وفى الحقيقة اعتقد فى الأصل أن الكورى هو عدد التفتتات الصادرة فى الثانية من 1g من الراديوم ولكن القياسات الدقيقة أوضحت أن الكورى المعروف بهذه الطريقة أكبر قليلا من القيمة العملية .

٢٨ - ٥ نواتج الانحلال والمتتاليات ذات النشاط الاشعاعى

حين تبتعث نواة ما جسيما فمن الواضح أنها تتغير بشكل ما . والنوى المشع الموجود فى الطبيعة يبتعث جسيمات α ، وجسيمات β وأشعة γ . وليس شعاع γ سوى شعاع من أشعة X وهو طاقة صرفة مقدارها $h\nu$ أو $h(c/\lambda)$ والنواة لا تفقد أية شحنة أو أية كتلة محسوسة عندما تبتعث شعاع γ . فالنواة ، إذن ، تتغير ولكن ليس بدرجة كبيرة بمثل هذا الابتعاث .

وعند ابتعاث شعاع γ تقوم النواة بمجرد ضبط تركيبها الداخلى بحيث يتهيأ لفقد بعض الطاقة . وهذا شبيه بابتعاث الضوء من الذرة . ففى الذرة ، يفقد قدر من الطاقة عندما يهبط الكترون إلى مستوى طاقة أدنى . على أننا لسنا واثقين عن ماذا يجرى حقيقة فى النواة حين يخرج منها شعاع γ . فالنواة قد هبطت إلى حالة أدنى للطاقة ولكننا لا نعرف ما يكفى حول تركيب النواة لكى نصف هذا النوع من الانتقال بنفس الدقة تقريبا التى اتبعناها فى حالة الذرة . وعلى أية حال ، إذا فقدت النواة $^{A}_{Z}X$ شعاع γ فإن التفاعل يكتب عادة بهذه الصورة :



$$^{A}_{Z}X \rightarrow \gamma + ^{A}_{Z}X$$

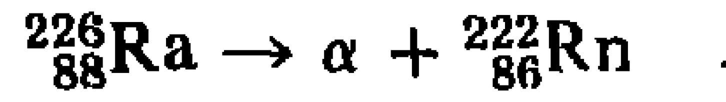
والشحنة النهائية Z وكذا الكتلة A للنواة هما نفسيهما مثلما كانا قبل ابتعاث شعاع γ

أما حين تبتعث النواة جسيم α ، فإن كتلة النواة تنقص بمقدار 4 وشحنتها بمقدار 2 وذلك راجع إلى أن جسيم α المبتعث هو فى الواقع نواة ذرة هليوم ، $^{4}_{2}He$ ولمثل هذا النوع من الابتعاث يمكن أن نكتب مايلى :



$$^{A}_{Z}X \rightarrow \alpha + ^{A-4}_{Z-2}Y$$

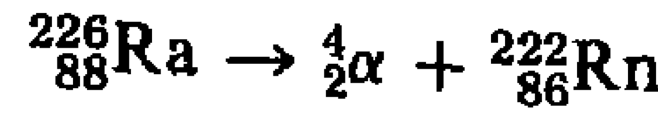
وكمثال محدد لنأخذ الراديوم حين يبتعث جسيم α ، وعندئذ



$$^{226}_{88}Ra \rightarrow \alpha + ^{222}_{86}Rn$$

والنواة الناتجة هى لغاز الرادون الخامل .

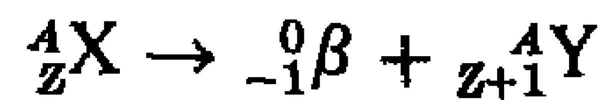
من المناسب أحيانا كتابة اعداد الكتلة والشحنة بالنسبة للجسيم أيضا :



$$^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{4}_{2}\alpha + ^{222}_{86}Rn$$

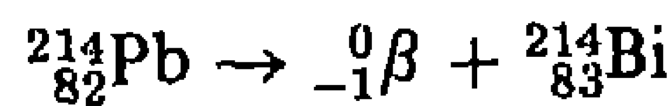
لاحظ فى هذه المعادلة أن مجموع أعداد الكتلة على كلا الجانبين يجب أن يكون متساويا وكذلك بالنسبة للشحنات .

جسيمات β هى ببساطة الكترونات . وحين تبتعث النواة جسيم β فإننا نجابه صعوبة تتعلق بالمفاهيم الأساسية إذ أنه لاتوجد الكترونات داخل النواة ، وعندئذ يمكننا أن نتخيل أن النيوترون هو بروتون زائد الكترون . (هذه بالطبع نبيطة تخيلية قد تكون مفيدة ولكن لاسند لصحتها) . عندما يبتعث جسيم β فإن النيوترون الأصلى فى النواة يستبدل به بروتون . ومن ثم يزيد ابتعاث جسيم β من الشحنة الصافية على النواة بمقدار 1 ولايكاد يغير من كتلتها . (لأن كتلة الالكترون صغيرة جدا) . وفى احدى الحالات النموذجية ،



$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{0}_{-1}\beta + ^{A}_{Z+1}Y$$

ولتصور هذا النوع من التفاعل سنناقش واحدا من نظائر الرصاص ذات الكثرة الضئيلة وهو $^{214}_{82}Pb$ الذى نصف عمره 26.8 min وينحل بابتعاث جسيمات β . ولهذا ،



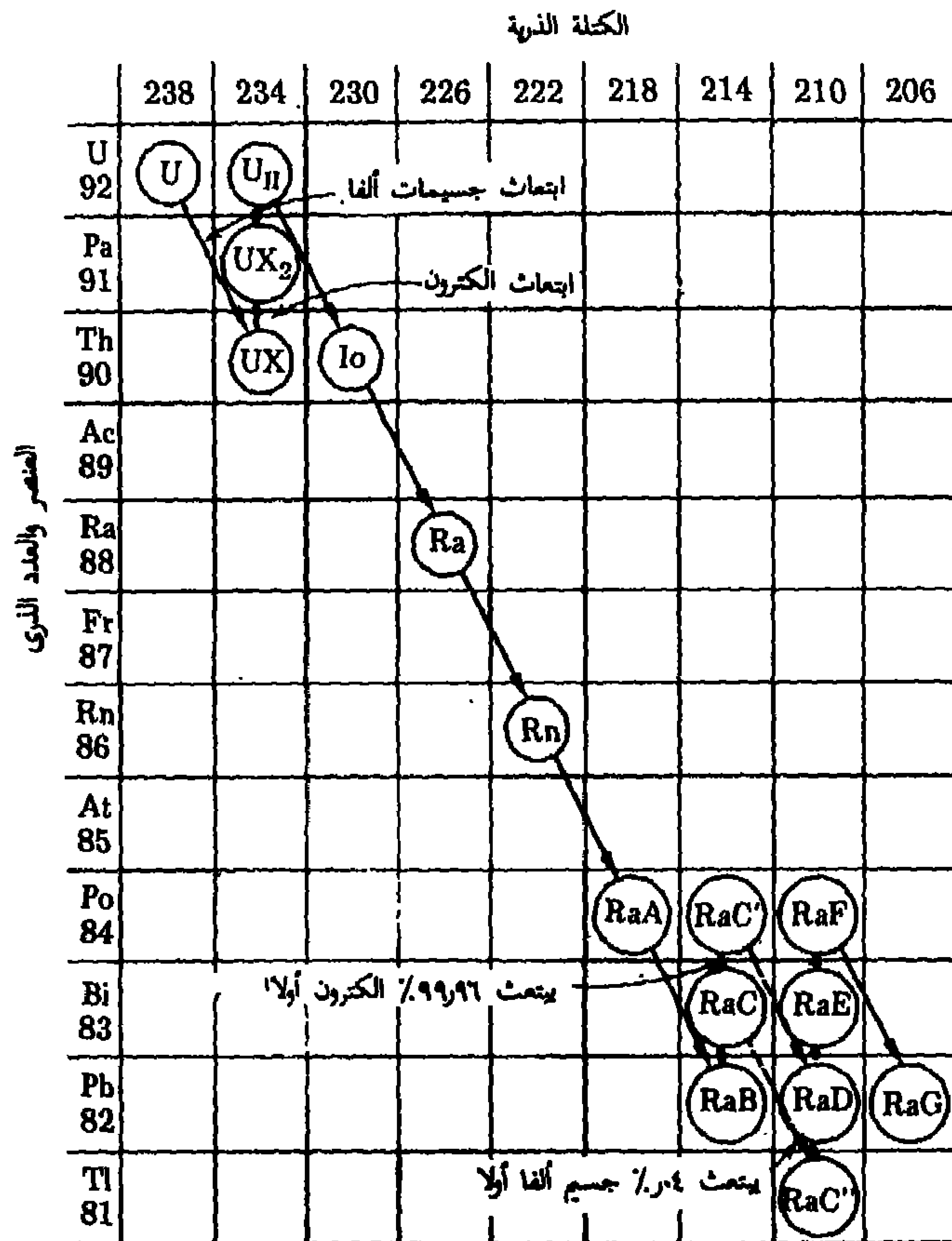
$$^{214}_{82}Pb \rightarrow ^{0}_{-1}\beta + ^{214}_{83}Bi$$

ينحل نظير البزموت المتكون فى هذا التفاعل بابتعاث β أيضا . وكلا النظيرين ليسا سوى خطوات فى متتالية من الانحلالات .

متسلسلة الانحلال

تعتبر متتالية اليورانيوم مثالا مثيرا على ذلك النمط من الانحلال الذى تنحل فيه نواة إلى أخرى وتنحل هذه إلى نواة أخرى وهكذا . اليورانيوم 238 يعتبر مشعا طفيفا ، ونصف عمره 4.5×10^9 yr وينحل طبقا للنهج الموضح فى الشكل ٢٨ – ٦ ، وعليك تتبع هذا النهج خطوة فخطوة حتى تدرك معناه . لاحظ أن الأسماء مثل راديوم A ، وهكذا ، تستخدم بدلا من الأسماء الذرية العادية المذكورة إلى اليسار فى الشكل . وهذه هى الطريقة المتبعة أحيانا وليس دائما لكتابة أسماء أعضاء هذه المتتالية .

النواة النهائية فى الشكل (٢٨ – ٦) هى الرصاص بالنسبة لهذه المتتالية . هناك متتاليتان أخريان كهذه تحدثان فى الطبيعة وكل منهما تبدأ بنواة ذات نصف عمر طويل . وربما كان هنالك متتاليات أخرى انحلت وانتهى أمرها إلى آثار ضئيلة لاتحس . وعلى أية حال يكون أخر عضو فى المتتالية نواة مستقرة دائما ، والنواة النهائية لكل متتالية هى نواة الرصاص ولكنها نظير مختلف فى كل حالة .



شكل (٢٨ – ٦)
متتالية اشعاعية نموذجية تسمى متتالية اليورانيوم وذلك لأن اليورانيوم هو النواة المتوج .

٢٨ - ٦ التفاعلات النووية والتحولات :

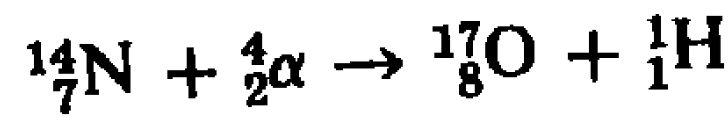
عندما كتبنا معادلة الانحلال الاشعاعى ،



$$^{226}_{88}Ra \rightarrow \alpha + ^{222}_{86}Rn$$

فى القسم السابق ، فإننا بذلك كتبنا **تفاعلا نوويا** . وهناك العديد من العوامل التى تحدد ما إذا كان تفاعل نووى ما مفترض سيحدث حقيقة أم لا . وإن كان هذا التفاعل المعين يحدث بالفعل . ونحن نعلم أن الطاقة الكلية ، بما فى ذلك طاقة السكون للمواد الداخلة فى التفاعل الاصلية (وهى مجرد $^{226}_{88}Ra$) مساوية للطاقة النهائية للنواتج . ولكى يكون هذا صحيحا ، لزم أن تكون كتلة السكون لنواة الراديوم الأصلية أكبر من أو تساوى كتل السكون للناتجين وهما نواة الرادون وجسيم α . أما إذا لم يكن هذا صحيحا فإننا نكون قد خلقنا كتلة أثناء التفاعل وحيث أننا افترضنا عدم وجود أى مصدر خارجى للطاقة يؤثر على النظام فإننا بذلك نخلق كتلة من لاشيء وهذا مستحيل بالطبع .

وكون الطاقة الكلية قبل التفاعل (بما فى ذلك الطاقة المكافئة لكتل السكون) مساوية للطاقة الكلية بعد التفاعل ، يعتبر أداة مفيدة لدراسة التفاعلات النووية . ففى واحد من أوائل التفاعلات النووية المستحثة والتى أجراها رذرفورد عام ١٩١٨ ، قام بقذف جسيمات α. نحو نوى النيتروجين ولاحظ التفاعل التالى ،



$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

ويعنى هذا أن جسيم α قد دخل نواة ^{14}N التى قامت بعد ذلك بالانحلال عن طريق طرد بروتون وبهذا **تحولت** نواة النيتروجين الأصلية إلى أكسجين . ولنا أن نتساءل عما إذا كانت جسيمات α البطيئة قادرة على انجاز هذا التفاعل .

ولكى نعلم أكثر عن هذا التفاعل ، نلاحظ أن كتل المواد الداخلة فى التفاعل هى

كتلة ^{14}N = 14.0031 u

كتلة ^{4}He = 4.0026

مجموع الكتل قبل التفاعل = 18.0057 u

وبنفس الطريقة ، يمكننا فحص الكتل بعد التفاعل ،

كتلة ^{17}O = 16.9991 u
كتلة ^{1}H = 1.0078

مجموع الكتل بعد التفاعل = 18.0069 u

ونجد على الفور أن النواتج لها كتلة أكبر من كتلة المواد الأصلية فى التفاعل ، والفرق بينهما 0.0012 u ، وهذه الكتلة يمكن أن تخلق فقط فى حالة إضافة طاقة أضافية إلى التفاعل . وحيث أن 1.0 u تكافىء 931 MeV كما فى المثال التوضيحى (٢٨ — ١) لذا فالزيادة فى الكتلة فى هذا التفاعل تتطلب قدرا من الطاقة الخارجية يساوى $(0.0012)(^{931}/_{1}) = 1.1$ MeV أى أن جسيمات α الساقطة يجب أن يكون لديها كمية من ط .ح تساوى على الأقل هذا القدر من الطاقة حتى تجعل التفاعل يتم . وفى الواقع لما كانت كمية التحرك أيضا يجب أن تكون محفوظة فى هذا التفاعل لذا فالنواتج النهائية لن تكون واقفة فى حالة السكون . ولهذا يجب أن تكون طاقة الحركة للجسيم أكبر من 1.1 MeV إذا أريد لهذا التفاعل أن يتم .

وتقدم الحسابات من هذا القبيل الكثير حول احتمالات التفاعلات النووية المقترحة . ومن الطبيعى أن يكون هناك كثير من التفاعلات الممكنة . وفى الحقيقة فإن مجال التفاعلات النووية فى الفيزياء يشبه فى تشابكه موضوع التفاعلات العضوية فى الكيمياء .

٢٨ — ٧ القوى النووية والاستقرار النووى

لقد أتيح لنا بدراسة الفيزياء معرفة قوتين أساسيتين حتى الآن . احداهما هى قوة الجذب وهى على قدر كبير من الأهمية عندما تكون الأشياء المعنية ضخمة الكتلة . وهذه القوة تجذب دائما وان كانت واهنة . فإذا وضع جسمان على منضدة لجذب كل منهما الآخر ولصغر القوة فإن قياسها لايمكن الا بأجهزة فائقة الحساسية .

أما القوة الأساسية الثانية والتى صادفتنا فيما سبق فهى القوة الكهربائية وهى أما قوة تجاذب أو تنافر استنادا إلى الشحنات المعنية . وهذه القوة كبيرة بدرجة كافية ومن السهل تمثيلها بالشحنات الالكتروستاتية ، فمن السهل قياس القوة التى تؤثر بها كرتان مشحونتان ، مثلا ، احداهما على الأخرى . وقد ظن — فى وقت ما — أن القوى المغناطيسية تختلف عن القوى الكهربائية ولكن بعد استخدام نظرية النسبية ، اتضح أن هاتين القوتين هما أساسا نفس الشيء . والقوة الكهربائية هى التى تمسك بالذرات معا وكذا بالسوائل والجوامد . وترتبط معظم الظواهر التى نقابلها فى حياتنا اليومية ارتباطا وثيقا بهذه القوة .

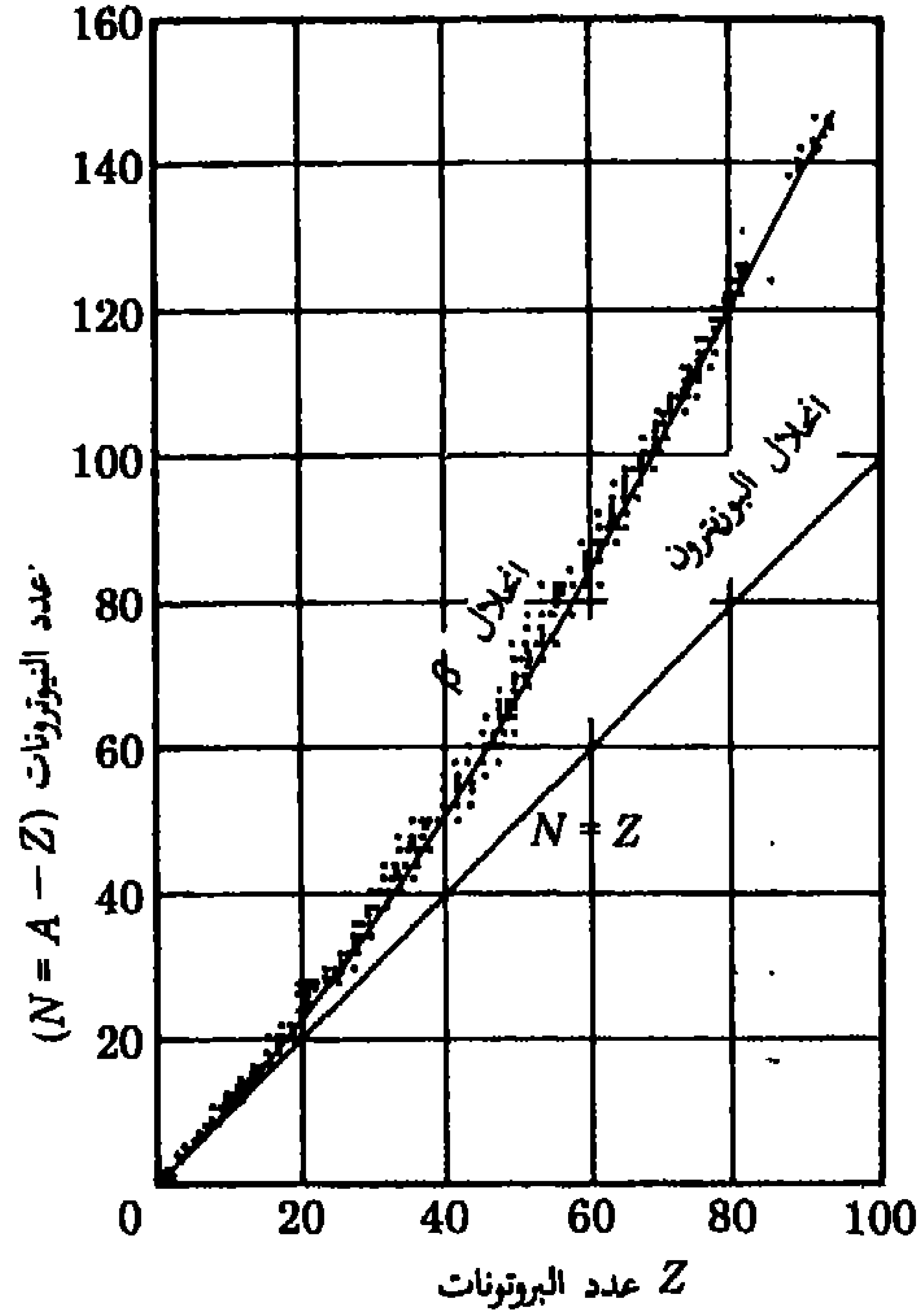
هناك أيضا قوة أخرى قد لاتكون مألوفة لديك . وهذه القوة الثالثة هى التى تمسك بالنويات معا داخل النواة . وعلى عكس القوتين الأخريين لاتخضع هذه القوة لقانون التربيع العكسى ، ولعلك تذكر أن كلا من قوة الجذب والقوة الكهربائية تتغير تبعا للعلاقة $1/r^2$ ولذا فهى قوى بعيدة المدى بمعنى أنها قوى محدودة ولاتصل للصفر حتى عند قيم كبيرة للمسافة r .

وتعتبر القوة النووية من ناحية أخرى قوة ذات مدى قصير جدا بمعنى أن نويتين تؤثران بقوى ضئيلة للغاية على كل منهما الأخرى حتى تصير المسافة بينهما أقل من 5×10^{-15} m وعندئذ تتجاذبان بشدة كلما قلت المسافة عن هذا . وقوة الجذب النووى من الكبر بمكان بحيث أنه عندما تكون المسافة صغيرة جدا بين النويات فإنها تتغلب تماما على قوى التنافر الكهربائية . فعلى الرغم من أن بروتونين ، مثلا ، تتنافر شحنتاهما المتشابهة مع بعضها البعض ، الا أنهما يتماسكان بشدة بواسطة القوة النووية . وبتقريب أولى – على الأقل – تكون القوة النووية التجاذبية هى نفسها بين البروتون والبروتون وكذلك بين نيوترون ونيوترون أو بين بروتون ونيوترون .

وعلى الرغم من شدتها ، الا أن القوة النووية عاجزة عن الامساك بعدد كبير من البروتونات معا بدون وجود عدد كاف من النيوترونات يقوم « بتخفيف » الشحنة الموجبة قليلا . فقوة التنافر الالكتروستاتية هى قوة بعيدة المدى ، « ويشعر » كل بروتون بأثر كل بروتون آخر داخل النواة . أما قوى التجاذب النووية فقصيرة المدى ولايشعر بها سوى أقرب الجيران من الجسيمات داخل النواة . ولهذا السبب – ضمن أسباب أخرى – لاتتكون تشكيلات مستقرة للنواة من البروتونات والنيوترونات إلا فى حدود معينة ويوضح الشكل (٢٨ – ٧) النوى المستقر المعروف .

لاحظ المحاور فى الشكل (٢٨ – ٧) . لو أن للنوى عدد متساو من البروتونات والنيوترونات لوقع هذا النوى على الخط $N = Z$، على أننا نرى أن النوى الأكبر يستلزم مزيدا من النيوترونات حتى يخفف من الشحنة الموجبة وحتى يضمن بالتالى قدرا من الاستقرار . يوضح الشكل أيضا الأنماط المختلفة لانحلال النوى غير المستقر والذى يحيد عما هو مبين . عليك أن تكون قادرا على اثبات أن أنماط الانحلال المبينة تميل إلى تحويل النوى غير المستقر إلى صورة مستقرة . (وفى هذا الصدد عليك أن تذكر أن شحنة البوزيترون هى $+e$ وكتلته هى كتلة الالكترون) .

لقد تعلمنا – بالاضافة إلى هذه الاعتبارات – من القسم (٢٨ – ٣) أن النقص الكتلى للنواة هو الذى يوفر لنا محكا آخر للاستقرار النووى . وقد رأينا فى الشكل ٢٨ – ٤ أن النوى قرب منتصف قائمة العناصر يكون له أعلى طاقة ترابط لكل



شكل (٢٨ – ٧)
النوى الموضح هنا على هيئة نقط هو نوى مستقر أو يزيد عمر النصف له عن 1000 سنة .

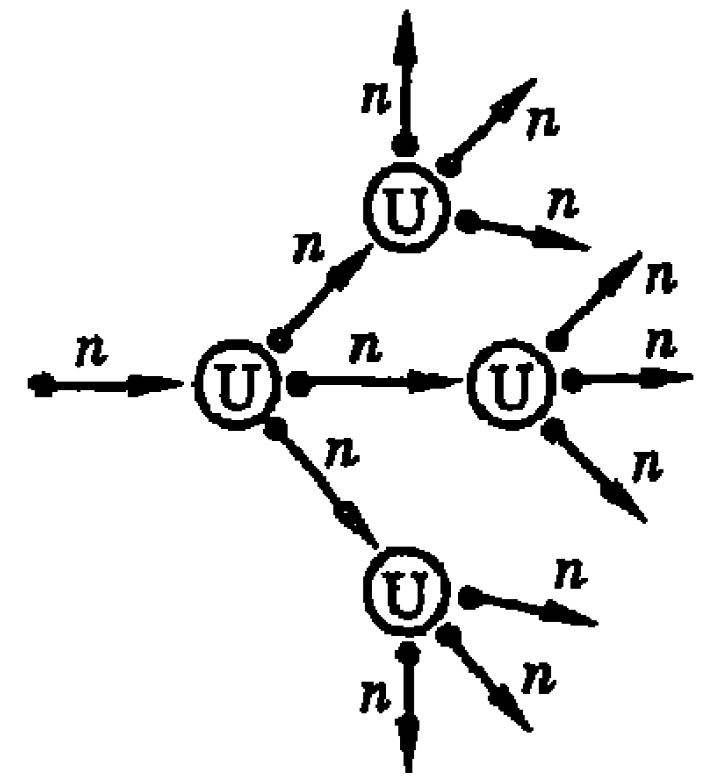
نوية . وهذا النوى ذو صلابة ذاتية ضد التفتت – أكبر من التى للنوى الموجود عند طرفى قائمة العناصر . وكما سنرى فيمايلى ينطوى هذا الأمر على دلالات ونتائج تطبيقية كبرى .

٢٨ – ٨ الانشطار النووى

تعتبر مصادر الطاقة النووية احد الاختيارات المطروحة أمامنا فى بحثنا عن الطاقة . ولنفحص الآن هذا التطبيق العملى للفيزياء النووية . لو رجعنا إلى الشكل (٢٨ – ٤) لوجدنا أن النوى الموجود فى طرفى قائمة العناصر تكون طاقته لكل نوية أكبر من مثيلتها عند العناصر الموجودة فى منتصف القائمة . افترض أن نواة ذات Z عالية كاليورانيوم قد شقت إلى نصفين بحيث يتكون جسيمان شحنة كل منهما $Z/2$ وكتلتهما متساوية . وبسبب النقص الكتلى ستكون كتلة هذه الجسيمات أكبر بكثير من كتلة النواة المستقرة للعنصر ذى العدد الذرى $Z/2$. وفى نهاية الأمر ، لتكوين نواتين مستقرتين وعدد كل منهما الذرى $Z/2$ يلزم أن يشع النصفان الأصليان غير المستقران طاقة تكافىء النقص الكتلى . وكما وجدنا من قبل ، يلزم لكى تحدث هذه العملية أن تتحرر كمية كبيرة من الطاقة ويمكن عندئذ الافادة منها ، ومن سوء الحظ أن انشقاق النوى ذى Z العالى إلى نوى ذى حجم متوسط وهى عملية تسمى **الانشطار** – هى عملية نادرا ماتحدث تلقائيا . وعلى الرغم من أن نواتج تفاعل الانشطار تكون طاقاتها أقل من المادة الأصلية الا أن التفاعل يستلزم وجود مؤثر خارجى حتى يكتمل .

هناك موقف مشابه لهذا فى الكيمياء ، فالخشب حين يحرق فى الهواء يعطى حرارة . من الواضح إذن أن المواد الداخلة فى التفاعل لديها من الطاقة ماهو أكثر من النواتج ومن ثم يكون التفاعل ممكنا . على أن الخشب لا يتحد تلقائيا مع الاكسجين عند درجة حرارة الغرفة – على الأقل ليس إلى حد بعيد . أى أن التفاعل الكيميائى بين الخشب والاكسجين يجب أن يبدأ أولا بواسطة وسيلة خارجية ما مثل شعلة ثقاب ساخنة مثلا . وبمجرد أن يبدأ التفاعل فإنه ينتج من الحرارة مايكفى لأن يظل مستمرا بشرط أن تكون الشروط الهندسية لقطعة الخشب بحيث لاتهرب الحرارة المتولدة بسهولة منها .

وقد اتضح أن نوى معظم العناصر الثقيلة لايستطيع أن ينشق بسهولة . وقد يؤدى قذفها بالجسيمات ذات الطاقة العالية أحيانا إلى الانشقاق . وعلى الرغم من أن الطاقة التى تنشأ عند حدوث تفاعل الانشطار تكون اكثر مما يحتاجه التفاعل لكى يبدأ ، إلا أن هذه الطاقة لايمكن استخدامها بسهولة لكى يحتفظ بالتفاعل مستمرا . ومن ثم فإنه على الرغم من أن كل النوى الثقيل يعتبر مصادر غنية بالطاقة الا أنه من غير العملى الحصول على الطاقة الناشئة من تفاعل الانشطار فى جميع الحالات تقريبا .



شكل (٢٨ – ٨)
يمكن بدأ تفاعل متسلسل بواسطة نيوترون واحد .

على أن هناك حالات قليلة ، ثبت فيها أن لتفاعل الانشطار أهمية تطبيقية . وقد اكتشفت أولى هذه الحالات على يد هاهن وستراسمان عام ١٩٣٩ وقد وجد بمساعدة آخرين أن نظيراً لليورانيوم وهو ^{235}U يمكنه اقتناص (أو يجذب اليه) نيوترون يتحرك ببطء ، وعندئذ يستطيع أن يقوم بعمل انشطار تلقائى* . وهاهو تفاعل انشطار لم يستلزم قذفا عن الطاقات العالية . علاوة على ذلك ، حين تنشق كل نواة ^{235}U فإن نواتج التفاعل تتضمن حوالى ثلاثة نيوترونات ، وكمية كبيرة بالطبع من الطاقة الناشئة حيث تعطى كل نواة ^{235}U حوالى 200 MeV من الطاقة عند انشقاقها .

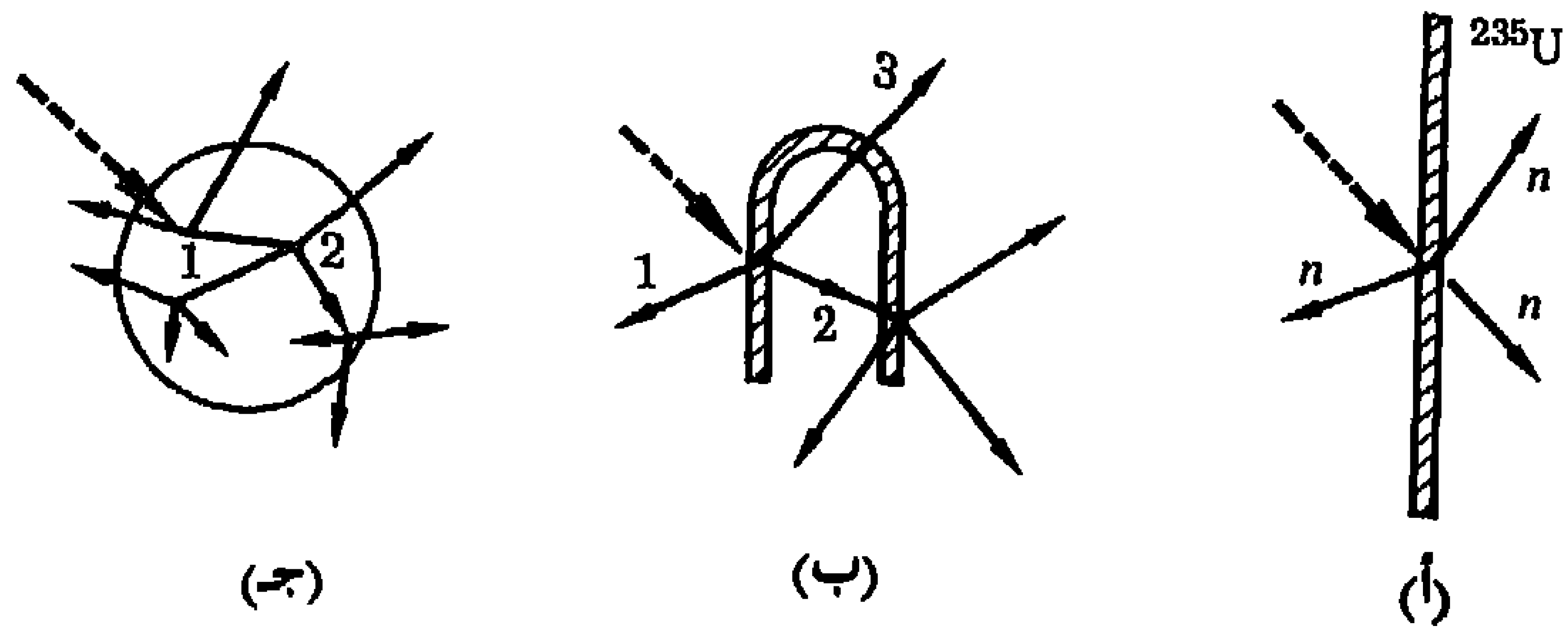
تفاعل متسلسل

يمكننا ، إذن ، تصور **تفاعل متسلسل** فى ^{235}U يبدؤه نيوترون بطىء واحد . وهذا مايصوره الشكل (٢٨ – ٨) بشكل بيانى حيث تشاهد أول خطوتين من التفاعل فقط أما إذا تم قنص جميع النيوترونات بنجاح بواسطة نوى ^{235}U فإن النيوترون الأصلى يكون قد أنتج 3^2 نيوترونا . أما فى موقف نموذجى حيث تحدث n خطوة فى التفاعل المتسلسل فإننا نكون قد حصلنا على 3^n نيوترونا . ولو أن كل خطوة من التفاعل تستغرق 0.01 s فإنه عند نهاية ثانية واحدة يكون العدد الكلى

* يشكل نظير اليورانيوم 0.7 فى المائة فقط من خليط نظائر اليورانيوم الموجودة فى الطبيعة .

للنيوترونات 3^{100} أو مايقرب من 10^{48} . ولما كان 235 g من ^{235}U تحتوى على 6×10^{23} ذرة فقط فلك أن تدرك أن هذا التفاعل يمكن أن يحدث بعنف تفجيرى .

ولو أريد للتفاعل أن يستمر سلسا وأن يكون ذاتى المداومة فإنه تلزم كتلة حرجة من ^{235}U كما هو مبين بسهولة فى الشكل (٢٨ -٩) ، فحين يحدث الانشطار فى الغشاء الرقيق المبين فى الجزء (أ) فإن النيوترونات الناتجة يمكن أن تهرب بسهولة فى الهواء ومن ثم لايستمر التفاعل فى النمو . أما فى الجزء (ب) فالموقف أكثر ملاءمة بشكل أو بآخر . ولكنه هنا أيضا يتوقف تماما بعد خطوتين فقط بسبب فقدان النيوترونات فى الأجسام المحيطة . ويرى فى الشكل (جـ) كرة من ^{235}U . لو أن هذه الكرة كانت كبيرة بدرجة كافية فإن معظم النيوترونات الناتجة سوف تقتنص قبل أن تتمكن من الهرب . والكتلة الحرجة هى عبارة عن كمية من ^{235}U يقوم فيها نيوترون واحد – فى المتوسط – من كل تفاعل ببدء تفاعل جديد ، وبهذه الطريقة يظل التفاعل مستمرا بسلاسة بنفس معدله الابتدائى البطىء .

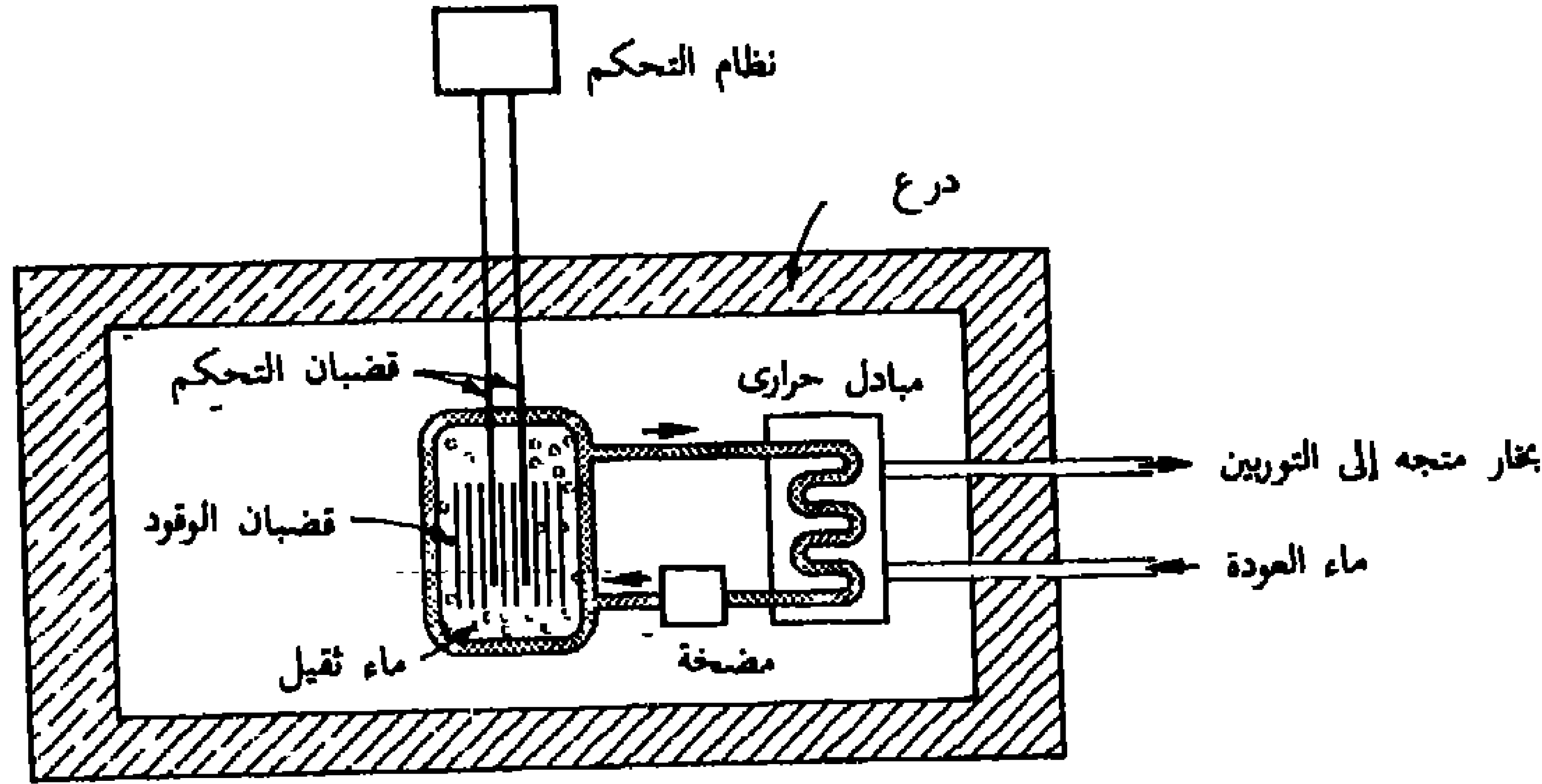


شكل (٢٨ – ٩)
تعتمد كفاءة استخدام النيوترون على حجم وشكل قطعة اليورانيوم ^{235}U

إذا كانت الكمية المستخدمة من اليورانيوم أكبر بكثير من الكتلة الحرجة ، فإن التفاعل سينمو بمعدل سريع ويؤدى هذا إلى حدوث انفجار . وقد يكون هذا مطلوبا إذا أراد الانسان صنع سلاح نووى . على أنه ، فى المفاعلات النووية ، يراد للتفاعل أن يستمر بشكل سلس بحيث ينتج فى النهاية مصدر منتظم وغير متفجر للطاقة . ومن الناحية العملية يمكن التحكم فى عدد النيوترونات المتفاعلة فى المفاعل باستخدام قضبان ماصة للنيوترونات ، فقضبان الكادميوم ، مثلا ، تمتص النيوترونات بسهولة وبذا تبعدهم عن التفاعل ، ومن ثم ، لو وضعت هذه القضبان داخل المفاعل فإن التفاعل النووى يأخذ فى الابطاء . ويمكن ضبط معدل التفاعل بشكل جيد بالتحكم فى وضع قضبان من هذا النوع فى المفاعل .

٢٨ - ٩ المفاعلات النووية

المفاعل هو محطة قوى نووية تخدم نفس الغرض الذى يخدمه الفرن فى مولد بخارى . فهو يعمل كمصدر هائل للحرارة ثم تستخدم هذه الحرارة فى انتاج البخار الذى يستخدم بدوره فى إدارة التوربينات لنظام مولد كهربائى . ويوضح الشكل (٢٨ - ١٠) رسما تخطيطيا لمفاعل نموذجى .



شكل (٢٨ - ١٠)
رسم تخطيطى لمفاعل

يتكون قلب المفاعل من المادة القابلة للانشطار ، أو الوقود ، وهى محفوظة فى أنابيب اسطوانية محكمة . لقد كان ^{235}U الوقود الأساسى للمفاعلات أما الآن فتستخدم مواد أخرى قابلة للانشطار وهى على هيئة قضبان للوقود . تغمر هذه القضبان فى مادة كالماء أو الكربون أو الهيدروكربونات أو أية مواد شبيهة تكون كتلتها الذرية منخفضة . وهذه المادة وهى تسمى مهدىء النيوترونات تبطىء النيوترونات الناتجة عن الانشطار . وتعكسهم إلى المادة القابلة للانشطار مرة اخرى . (يستخدم كثيرا الماء المصنوع من النظير ^{2}H بدلا من ^{1}H لأنه أقل ملائمة لإزالة النيوترونات من التفاعل .) يعمل مهدىء النيوترونات أيضا عمل سائل المبادلة الحرارية حتى يحمل الحرارة بعيدا عن قضبان الوقود وذلك فى التصميم المبين بالشكل .

عندما تنشطر نواة ما داخل قضيب للوقود ، فإن نوى على درجة كبيرة من عدم الاستقرار ينتج بحيث تكون Z له متوسطة ، وهذا النوى بدوره يمر بفترة انحلال إشعاعى مكثف وتخرج فى هذه العملية جسيمات ذات طاقات عالية . وحين يحدث إبطاء لسرعة هذه الجسيمات فإن طاقتها تتحول إلى حرارة وبذا تقوم بتسخين نظام المفاعل . ثم تحمل هذه الحرارة بعيدا فى المبادل الحرارى بواسطة الماء الثقيل .

تنتقل الحرارة فى المبادل الحرارى إلى الماء العادى فى نظام مرجل للبخار فيتولد بخار يمكن استخدامه لتشغيل التوربينات الكهربائية وكما نرى فالبخار نفسه لايتصل اتصالا مباشرا بقلب المفاعل ولذا فمنسوب النشاط الاشعاعى يكون منخفضا . أما

السائل الذى يتغلغل داخلَ القلب فإنه يتعرض لقذف اشعاعى من نواتج الانشطار . وكباقى اجزاء مادة القلب ، يصبح السائل على درجة عالية من الفعالية الاشعاعية .

حين تستخدم مادة قضبان الوقود لفترة تصل إلى عدة شهور فإن مابها من مادة قابلة للانشطار يأخذ فى النفاذ وعندئذ تنزع القضبان ويستبدل بها قضبان جديدة . ولسوء الحظ لازلنا نفتقر إلى وسيلة مرضية للتخلص من نفايات القضبان القديمة التى تحتوى على نواتج الانشطار وهى تتميز بأعمار طويلة نسبيا على درجة عالية من الفعالية الاشعاعية التى تتطلب قرونا حتى تنحل إلى مستويات غير ضاره . وتعتبر مشكلة التخلص من هذه النفايات أحد العيوب الرئيسية للمفاعلات النووية .

على أن المفاعلات يمكن أن تمدنا أيضا بالمواد المشعة اللازمة للأغراض الطبية والصناعية وغيرها . وتصنع مصادر الاشعاع العديدة ، والمستخدمة حاليا فى المستشفيات والصناعة ومعامل البحوث ، بوضع مواد مناسبة داخل قلب المفاعل . وبالاضافة إلى ذلك هناك كثير من مفاعلات البحوث فى أجزاء كثيرة من العالم . ويضخ الاشعاع الكثيف داخل قلوبها خلال « أنابيب » إلى خارج المفاعل على شكل حزم اشعاعية قوية . وكما نرى فعملية الانشطار لها فوائد عظيمة كما أن لها أخطاء جسيمة للبشرية .

٢٨ – ١٠ التفاعل الاندماجى

تبنى عملية الانشطار على فكرة أن النوى ذا Z العالية تكون بها طاقة لكل نوية أكبر بكثير مما فى النوى ذى Z المتوسطة . ولنعتبر الآن عملية أخرى يتم فيها اطلاق الطاقة كما يشارك فى هذه العملية نوى ذو اعداد ذرية صغيرة . وقد وجدنا عند مُناقشة النقص الكتلى أن الطاقة تنطلق عندما تندمج البروتونات والنيوترونات معا لتكوين نواة الهليوم . وهناك عملية شبيهة ممكنة عندما يندمج أى نوى خفيف معا لتكوين نوى ذى Z متوسطة . ويدلنا الشكل (٢٨ – ٤) على أن طاقة معينة يجب أن تنطلق فى مثل هذه العملية الاندماجية .

ولسوء الحظ ، يعتبر الاندماج النووى أكثر صعوبة من الانشطار . فالشحنة الالكتروستاتية على النواة تساعد عملية الانشطار وذلك لأن الشحنات المتشابهة تتنافر بينما إذا حاولنا أن ندمج بروتونين ، مثلا فإن التنافر الكولومى للنواتين سيعيق عملية الاندماج . ويمكننا بصعوبة بالغة أن نحضر نواتين خفيفتين إلى مسافة قريبة من بعضهما البعض حتى يتاح لقوى التجاذب النووية أن تمسكهما معا . وعلى الرغم من أن التفاعل الاندماجى الاجمالى تصدر عنه طاقة أكبر من الطاقة التى وضعت فيه فى البداية الا أن قدرا هائلا من الطاقة يلزم لبدء هذا التفاعل .

ويعتبر الاستخدام الوحيد للتفاعل الاندماجى على وجه الأرض هو النموذج الاندماجى للقنبلة النووية . ففى تلك القنبلة يتم اشعال التفاعل الاندماجى بواسطة قنبلة من النوع الانشطارى . وتكون درجة الحرارة داخل قنبلة الانشطار من الكبر بحيث تمد النوى ذا Z المنخفضة بما يكفى من الطاقة لكى يندمج . والعمل يدور على قدم وساق فى العالم كله لايجاد السبل العملية لانتاج والتحكم فى التفاعل الاندماجى . فإذا نجحت تلك المساعى لأمكن استبدال التفاعل الاندماجى بالتفاعل الانشطارى فى انتاج الطاقة النووية . على أنه ليس من المتوقع الوصول إلى هذا المصدر للطاقة قبل مرور سنوات عديدة قادمة لو كان هذا ممكنا على الاطلاق . وعلى الرغم من هذا فالتفاعل الاندماجى هو الذى يمدنا بطريق غير مباشر بمعظم الطاقة التى نحتاجها فى الحاضر ، لأنه كما سنرى فى الفصل القادم هو مصدر اشعاع الشمس .

٢٨ - ١١ الاشعاع : آثاره والكشف عنه

كلما تقدمنا فى استخدام الطاقة النووية والمصادر الأخرى للاشعاع كلما زادت أهمية التأثيرات التى تحدثها الاشعاعات على الجسم البشرى وعلى المواد التى نستخدمها . ويمكن تعلم القدر الكبير من المعلومات عن الاشعاعات ذات الطاقات العالية وذلك عن طريق دراسة الخواص النموذجية لجسيمات α وجسيمات β والنيوترونات واشعة γ . فتفاعل البروتونات مع الذرات ، مثلا ، شبيه جدا بسلوك جسيمات α وكذلك هناك تشابه بين المجموعات الأخرى التى ذكرت .

جسيم α كبير نسبيا (4 u) ويحمل شحنة مزدوجة .($+2e$) . وعند قذف ذرة ما بهذا الجسيم فلنا أن نتوقع اصطدامه بالذرات بشكل متواتر . وقد وجد أن جسيمات α توءين الهواء – فى الواقع – بسرعة كبيرة . فعند انتقالها فى الهواء تقوم من حين لآخر بالتصادم مع ذرة ما وتطلق منها الكترونا حرا . (ان استخدام كلمة « تصادم » هنا ليس دقيقا تماما فحتى لو مر جسيم α الموجب بالقرب من ذرة ما فإن التجاذب الكهربائى بينه وبين الالكترون السالب يمكن أن يؤدى إلى التأين) .

ويمكن بطرق سندرسها مستقبلا أن نجعل مسار الجسيمات المشحونة فى الهواء مرئيا . وفى الواقع يمكن عد حتى الأيونات المنفردة التى تنتجها هذه الجسيمات . وقد وجد أنه حتى جسيمات α ذات الطاقة المرتفعة لاتستطيع الانتقال فى الهواء الا لمسافة قصيرة قبل أن يتم إيقافها . فعلى سبيل المثال يبلغ مدى جسيمات α ذات الطاقة 7.7 MeV والصادرة عن راديوم C ، حوالى 7 cm فى الهواء . ويكون المدى اقصر بكثير – بالطبع – فى المواد الأكثف . ففى الألومنيوم يمكن لنفس جسيمات α أن تخترق سمكا قدره 0.004 cm فقط . وهكذا فجسيمات α يمكن أيقافها بسهولة تامة .

وتجدر الاشارة هنا إلى أن جسيم α لايتوقف بعد تصادم واحد مع ذرة ما فقد بينت القياسات أن حوالى 35eV من الطاقة تفقد عند تأين كل ذرة فى الهواء . ومن ثم يمكن لجسيم طاقته 7.7MeV أن يخلق حوالى 0.2 مليونا من الأيونات قبل أن يخلد إلى السكون . وهذا العدد من الأيونات الناتجة من الجسيم أو بشكل اخر مدى الجسيم يمكن استخدامه كمقياس لطاقة الجسيم .

للبروتون خواص تشبه تلك التى لجسيمات α . وحيث أن كتلته تبلغ ربع كتلة جسيم α بينما شحنته نصف شحنة جسيم α لذا يكون من المتوقع أن البروتون لايؤين الهواء بنفس القوة التى لجسيمات α . وقد اتضح أن هذا صحيح . ينتقل البروتون مسافة تتراوح بين ٥ إلى ١٠ مرات أبعد مما ينتقله جسيم من جسيمات α وله نفس الطاقة ، داخل المادة . ويتضح من هذا أن البروتونات أقل كفاءة فى تأين الذرات من جسيمات α بما يقل عن الخمس .

وتختلف جسيمات β عن الجسيمين اللذين ناقشناهما حتى الآن اختلافا بينا . فكتلة جسيم β تصل إلى 1/1830 فقط من كتلة البروتون . وجسيم β الضارب يقدر على اقتلاع الكترون ذرى وتحريره ويكون هذا نتيجة لقوى التنافر فى هذه الحالة . وعلى الرغم من اختلاف الآلية فليس هناك – فى الحقيقة – فرق كبير بين التأثير النهائى للتأين الناشىء عن الضرب بجسيم سالب الشحنة أو موجبها بشرط أن يكون للجسيم نفس الكتلة . على أن هناك فرقا كبيرا بين فعل جسيم β وجسيم α وذلك راجع إلى اختلاف كتلتيهما . فتصادم جسيم α مع الكترون ما يشبه تصادم شاحنة وزنها 10,000kg بشاحنة دمية وزنها 2kg . وعلى هذا يمضى جسيم α، فى طريقه وكأنه لم يصدم أى شيء . أما فى حالة تصادم جسيم β أو أى الكترون مع الكترون اخر فى ذرة ما فإن ما يحدث أشبه بتصادم جسمين متساويين فى الحجم . وجسيم β ينحرف بشدة إذا تعرض لتصادم مباشر . وقد يفقد معظم طاقة جسيم β فى تصادم واحد وذلك اعتمادا على كيفية التصادم بين الجسيمات . على أن التصادم المباشر نادر الحدوث ولذا لا تكون انحرافات الجسيمات كبيرة عادة . وتقوم جسيمات β بعمل عدد قليل من التصادمات المؤينة وذلك لصغر شحنتها وكتلتها .

ومدى جسيمات β فى الهواء أكبر بكثير من مدى جسيم α الذى له نفس الطاقة .وكتقريب مبدئى يمكن تقدير أن جسيم β ينفذ فى المادة أبعد بمئات المرات عن جسيم α الذى له نفس الطاقة . وعلى الرغم من أن قطعة من الورق يمكنها ايقاف كثير من جسيمات α الا أنه ليس بالمستغرب أن تمر جسيمات β خلال مواد ماصة أسمك بكثير من هذا . على أن جسيمات β إذا ماقورنت بالنيوترونات أو أشعة γ فإنها سهلة الايقاف نسبيا .

ليس للنيوترونات أية شحنة وتقترب كتلتها من كتلة البروتون ولذا ليس هناك تنافر أو تجاذب الكتروستاتى بين هذه الجسيمات والأجزاء المختلفة الأخرى فى الذرة . ونتيجة لهذا لايتعرض النيوترون للتصادم إلا نادرا . وعند التصادم المباشر مع الكترون أو نواة فإن التصادم يحدث قبل أن يلحظ أى اضطراب فى مسار النيوترون . أما فى حالة جسيم β أو α فهما يؤينان الذرة بمجرد الاقتراب منها وذلك لأن القوى الالكتروستاتية بين الشحنات تؤثر بشدة على الذرات على الرغم من عدم حدوث تصادم حقيقى وهذا مستحيل بالنسبة للنيوترون . ومن ثم فالنيوترون ذو نفاذية عالية على الرغم من أنه جسيم ضئيل الأثر التأيينى .

لقد ناقشنا حتى الآن سلوك الجسيمات فقط ، أما أشعة γ فهى مختلفة تماما من حيث سلوكها عن كل الجسيمات وذلك لأنها اشعاعات كهرمغناطيسية ليس لها شحنة أو كتلة سكون . ومع هذا فقد ناقشنا بعض الحالات التى تتفاعل فيها أشعة X والضوء مع المادة وبالذات فى التأثير الكهرضوئى ، وظاهرة كومتون ؛ ولما كانت أشعة γ ليست الا أشعة x ذات أطوال موجية قصيرة ، فإن علينا أن نتوقع أن يكون لها نفس المميزات . وهذا فى الحقيقة هو واقع الأمر .

إن شعاع γ ، وهو فوتون ، يفقد عادة كل طاقته فى حدث واحد ، فيما عدا حالة استطارة كومتون . عندما يمر شعاع من أشعة γ أو الفوتونات خلال غاز ما . فإن كثيرا من الفوتونات سوف توقف عند تصادمها مع الالكترونات الذرية واقتلاعها من الذرات . وهذا ببساطة هو التأثير الكهرضوئى بطبيعة الحال ، وكما نعرف من خبرتنا بأشعة X فالإشعاع الكهرمغناطيسى قصير الموجة أو ذو الطاقة العالية يكون نفاذا إلى أقصى حد . فأشعة X التى تنفذ وتمر خلال أجسامنا عند عمل صورة فوتوغرافية بالاشعة تعتبر ، بالمقارنة مع أشعة γ ، إشعاعا منخفض الطاقة نسبيا أى تكون عادة أقل من 0.10 MeV .

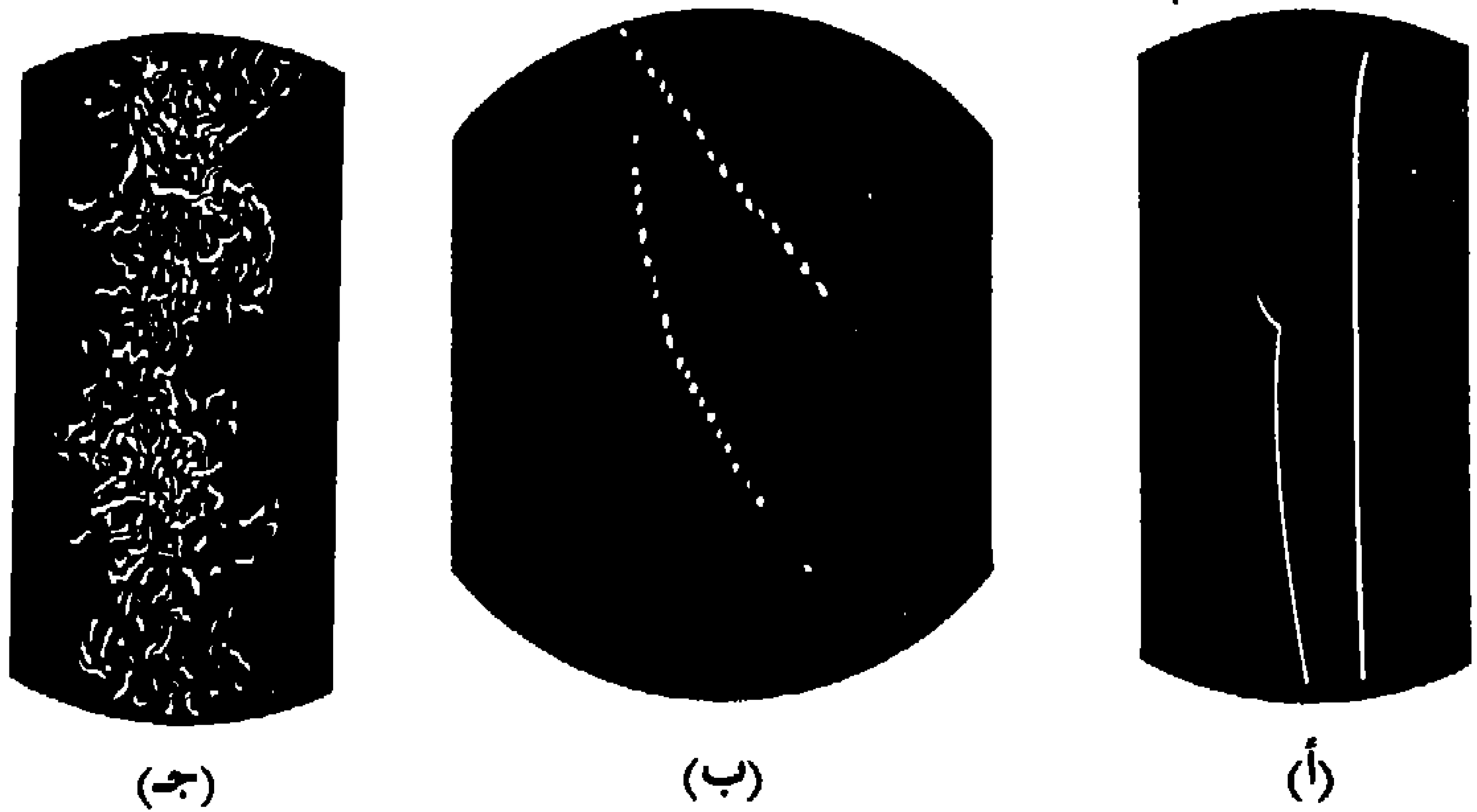
وعادة ماتصل طاقة أشعة γ المنطلقة من النوى إلى عدة ملايين من الالكترون فولت . وحيث أن قدرة أشعة γ على النفاذ هى بشكل عام أكبر للأطوال الموجية القصيرة فإنه يصبح واضحا أن أشعة γ عالية النفاذية . وأشعة γ ذات الطول الموجى القصير جدا أى ذات الطاقة العالية ، قادرة على النفاذ من الخرسانة التى يصل سمكها إلى عدة بوصات . وحيث أن الأثر الكهرضوئى يشكل القسم الأكبر من فقد أشعة γ من شعاع ما عند طاقات ليست بالعالية جدا ، لذا فالمواد التى تحتوى على عدد كبير من الالكترونات فى وحدة الحجوم تكون بالضرورة من أجود الماصات لأشعة γ . ولهذا السبب تستخدم العناصر الثقيلة جدا ، وعلى وجه الخصوص الرصاص ، فى الوقاية ضد أشعة γ وأشعة X

من هذه المناقشة يتضح أن معظم هذه الأنواع من الإشعاع تسبب تأينا للذرات أثناء سيرها مما يشكل أساسا لمعظم الطرق المستخدمة لكشف هذه الأشعة .

المستحلبات الفوتوغرافية : عندما يمر جسيم مؤين أو فوتون خلال طبقة المستحلب فى لوح أو فيلم فوتوغراف ، فإن الأيونات المتكونة تكون بمثابة المحال الهندسية لتكوين برش الفضة عندما يتم اظهار المستحلب . ونتيجة لهذا تترك الأيونات على طول مسار الجسيم سجلا فوتوغرافيا لمسار الجسيم .

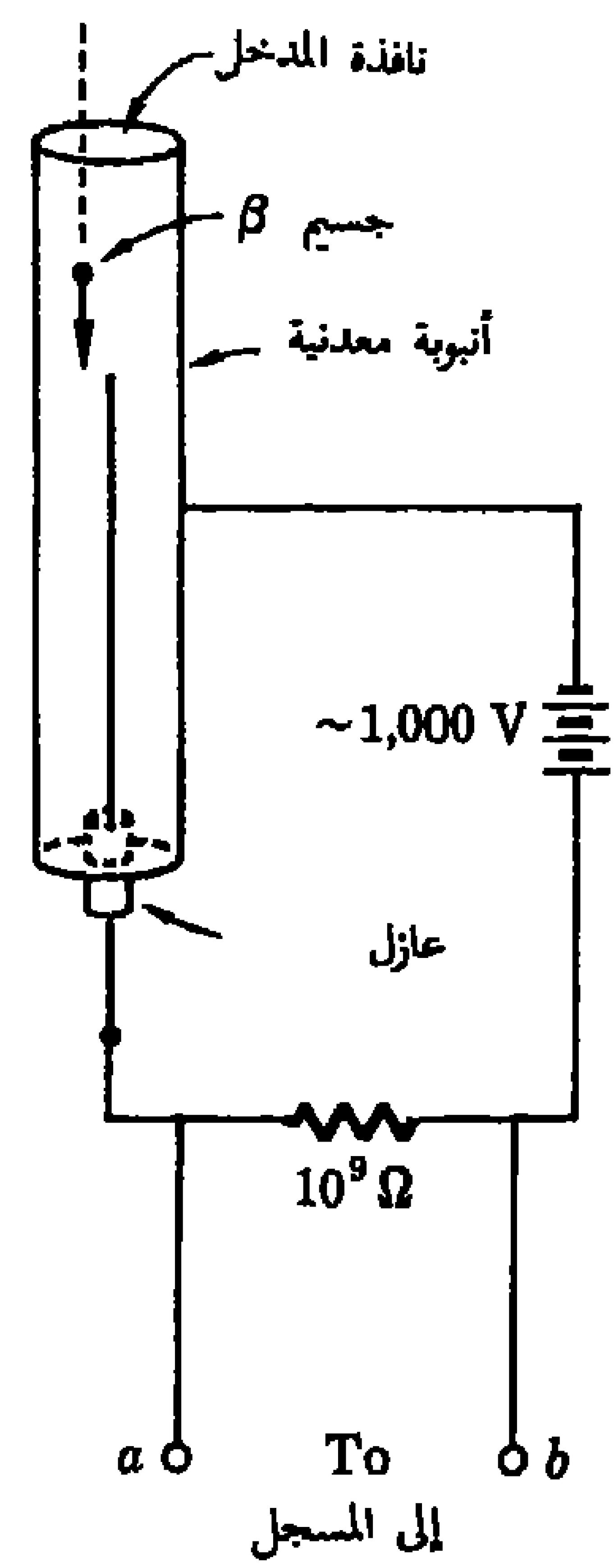
الغرفة السحابية وغرفة الفقاعات : عندما يكون الضباب على وشك التكوين فى بخار فوق مشبع ، أو عندما تكون الفقاعات على وشك التكوين فى سائل فوق مسخن فإن القطرات والفقاعات تتكون بأفضلية عند الأيونات . ومن ثم تمكن رؤية الأيونات على طول مسارات الجسيمات على هيئة قطرات أو فقاعات . ويوضح الشكل (٢٨ - ١١) أنماطا نموذجية تم رصدها فى غرفة سحابية . والأنماط المرئية فى غرفة الفقاعات تكاد تكون مشابهة تماما لهذه فيما عدا أن أطوال المسارات أقصر كثيرا وذلك لاختلاف كثافتى السائل والغاز . وعادة مايطبق مجال مغناطيسى على الغرفة مما يجعل مسارات الجسيمات تنحنى مما يوفر مزيدا من المعلومات حول الجسيمات .

عداد جيجر : تستخدم هذه النبيطة القابلة للحمل بشكل واسع فى كشف الاشعاع ويوضح الشكل (٢٨-١٢) ، التركيب الأساسى لها . هناك فرق جهد مرتفع بين أنبوبة معدنية وسلك يقع عند محورها . تملأ الأنبوبة بخليط خاص من الغازات عند ضغط منخفض ، وعندما يدخل جسيم إلى العداد من خلال نافذة رقيقة هى المدخل ، فإنه يكون عددا من الأيونات . ويكون التيار الذى يسرى بسبب هذه



شكل (٢٨ - ١١)
(أ) أثر أثنين من جسيمات α (ب) أثر أثنين من جسيمات β (جـ) لايترك شعاع γ أى أثر ولكن مساره واضح من مسارات جسيمات β التى تخلفت من الالكترونات التى طردت بواسطة أشعة γ .

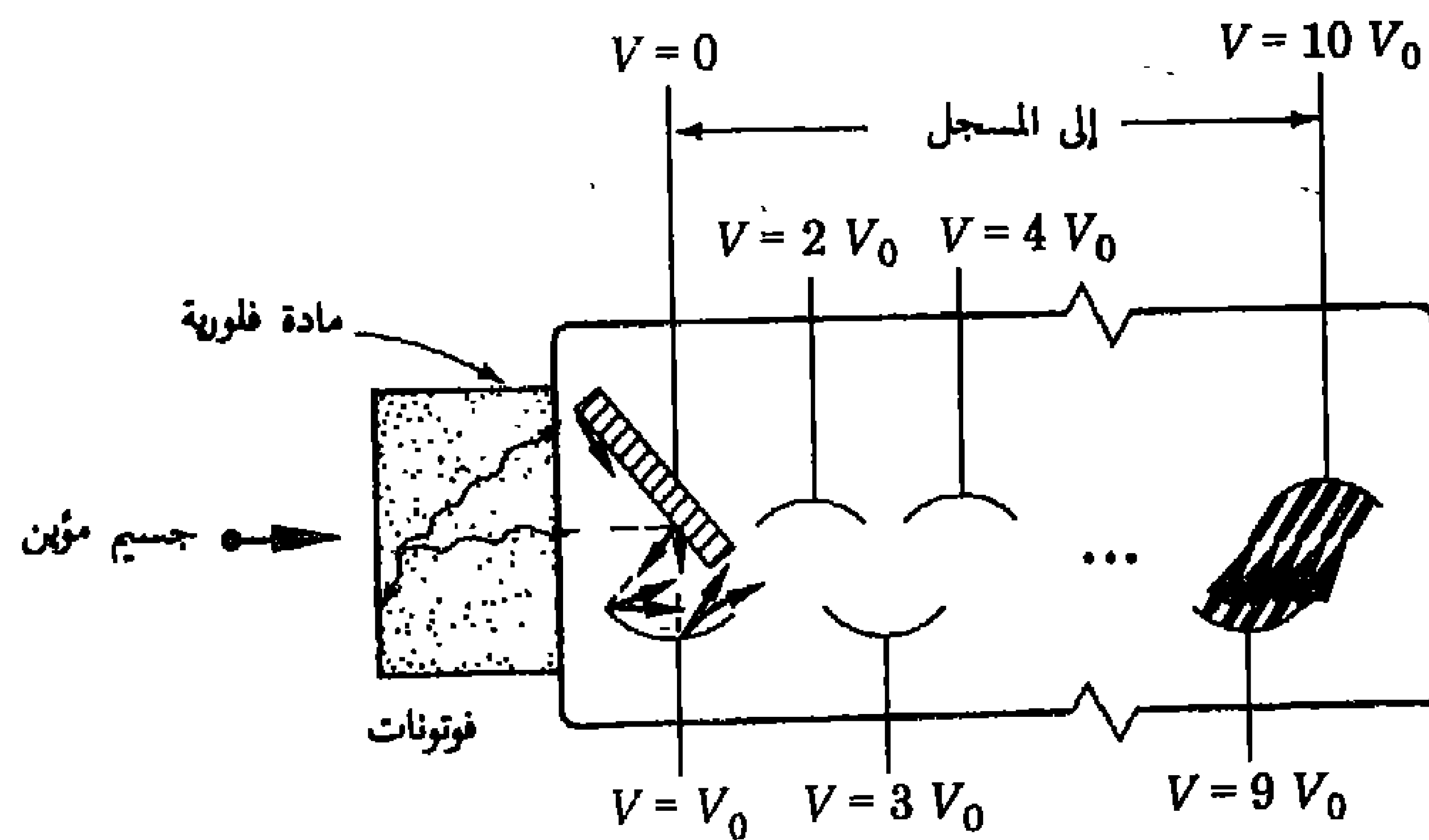
الأيونات بمفردها ضئيلا للغاية ولكن فرق الجهد المرتفع يجعل هذه الأيونات تنشىء تفريغا بداخل الأنبوبة وبهذا تسمح الأنبوبة لحظيا بإمرار تيار . ولأسباب لانستطيع تتبعها هنا يتوقف هذا التيار خلال كسر صغير من الثانية . ومن ثم فكلما دخل جسيم إلى أنبوبة العد ، مرت نبضة للتيار خلال الدائرة . وأى نبيطة تسجيل (كالزاعق وأجهزة القياس ، الخ) متصلة عبر الطرفين ab ستسجل حدوث هذه النبضات كلما حدث ذلك ، وبهذا يتم عد الجسيمات التى تمر خلال أنبوبة العداد .



شكل (٢٨ - ١٢)
عداد جيجر

عداد الوميض . عندما يصطدم جسيم متحرك بسرعة بمادة فلورية فإن نبضة ضوئية تصدر عن المادة . وهذه الحقيقة هى أساس تكون الصور فى أنبوبة التلفزيون وهى المبدأ الذى يبنى عليه عداد الوميض . هناك صمام ضوئى فى الشكل (٢٨-١٣) يقوم باكتشاف نبضات الضوء ، ولكن نبضة الضوء الناشئة عن جسيم واحد تكون ضئيلة للغاية ، لذا يستخدم صمام ضوئى من نوع خاص يسمى **مضاعف ضوئى** ويوضح الشكل مبدأ عمل هذا الجهاز . وهو يستخدم - تماما كعداد جيجر - فى كشف الاشعاع على نطاق واسع .

كاشفات الحالة الصلبة :ليست هذه النبيطات سوى صمامات ثنائية شبه موصلة فى الحالة الصلبة وكما قد تذكر فإنه لايمر أى تيار خلال هذه النبيطة فى الاتجاه العكسى . على أنه حين يمر جسيم سريع الحركة خلال منطقة الوصلة بين جزئى شبه الموصل سالب النوع وموجب النوع ، فإن نبضة تيار تمر خلال الثنائى . وهذه النبضة تستخدم لعد الجسيمات بنفس الطريقة التى تم بها العد فى النبيطتين السابقتين .



شكل (٢٨ - ١٣)
يقوم الضوء الصادر من الوامض - فى عداد الوميض - بانبعاث الالكترونات ضوئيا داخل الصمام الضوئى . تعجل الالكترونات فى المرحلة الأولى خلال فرق للجهد مقداره V_0 ويقوم كل الكترون بتحرير عدد من الالكترونات الثانوية . وتستمر هذه العملية التضاعفية حتى تنتج نبضة تيار قوية عند المخرج ، وهى أكبر بكثير عما هو مبين بالشكل .

٢٨ - ١٢ الجرعة الاشعاعية

كما رأينا فى القسم السابق فإن الاشعاع ذا الطاقات العالية قادر على تأيين الذرات ويمكنه أيضا تمزيق الجزيئات . والتلف الناشيء يشكل أهمية كبرى سنقوم بمناقشتها فى المستقبل والآن لنتعلم شيئا عن الوحدات المستخدمة لوصف آثار الاشعاع .

فى كثير من تطبيقات الاشعاع تكون الآثار المفيدة (أو الضارة) للاشعاع متناسبة بالتقريب مع كمية الطاقة الاشعاعية الممتصة . ومن ثم تلزمنا وحدة لقياس الطاقة الممتصة من حزمة اشعاعية داخل المادة . وتسمى وحدة الطاقة الاشعاعية الممتصة **rad** (*rd*). « الراد » وتعرف كما يلى : عندما يتعرض **1 g** من المادة ويقوم بامتصاص 10^{-5} J من الطاقة الاشعاعية فإن الجرعة الممتصة تكون **1 rad** . لاحظ أن الـ rad هو مقياس للطاقة الممتصة فى وحدة الكتل .

تعريف

وحدات الاشعاع الممتص

وتؤدى الطريقة التى يعرف بها rad إلى أن نفس الشعاع ينتج عنه جرعات مختلفة فى المواد المختلفة . فالشعاع الذى يمر خلال لحم آدمى سيمتص بصورة أقل مما يمتص فى العظام ونتيجة لهذا ، إذا مر شعاع خلال شخص ما فإنه يسبب جرعة أكبر للعظام التى يمر خلالها أكثر مما يسبب للحم .

ولسوء الحظ ليس الـ rad بالوحدة الجيدة لقياس أثر الاشعاع على البشر . وتكمن الصعوبة فى أن الأنواع المختلفة للاشعاع تسبب أضرارا متباينة للأنسجة البشرية . فالجرعة التى تبلغ 1 rad من شعاع الكترونى تسبب ضررا مقداره عشر ما تسببه جرعة مساوية من شعاع من النيوترونات أو البروتونات . وعلى الرغم من أن وحدة rad تعتبر مناسبة لاجراء مقارنة بين تأثيرات نفس النوع من الشعاع إلا أنها تصبح غير ملائمة عند مقارنة أنواع مختلفة من الاشعاع ولذا يلجأ إلى استخدام وحدة أخرى .

يقاس التأثير البيولوجى للاشعاع الممتص بدلالة وحدة تسمى « رم » *rem* (rad equivalent-man) . وهى وحدة مقارنة بمعنى أنها تقيس الأثر وذلك بمقارنته بالأثر الذى يحدثه شعاع من أشعة **X** طاقته **1 MeV** . حين يمتص **1 rd** من أشعة **X** فإن كمية محددة من التلف البيولوجى تحدث . ويعرف الـ **rem** بحيث أن جرعة مقدارها *1 rd* تسبب تلفا بيولوجيا يكافىء جرعة مقدارها **1 rd** من أشعة x ذات الطاقة *1-MeV* .

ولكى توضع وحدة rem بحيث ترتبط ارتباطا مفيدا مع وحدة rad فإننا ندخل كمية تسمى **عامل الجودة** (QF) للاشعاع . وهى عبارة عن نسبة يتم التوصل اليها كمايلى : يستخدم الاشعاع المطلوب دراسته لتشعيع المادة البيولوجية بحيث يؤدى إلى جرعة ممتصة مقدارها 1 rd . ثم تعرض نفس المادة البيولوجية للتشعيع من شعاع

تعريف

من أشعة X طاقته 1 MeV إلى أن يحدث تلف بيولوجى له نفس المقدار ثم تسجل الجرعة الممتصة بوحدات rad . ويمكننا عندئذ تعريف عامل الجودة على أنه النسبة بين هاتين الجرعتين :

$$\text{QF} = \frac{\text{الجرعة المكافئة من أشعة X}}{\text{1 rad من الاشعاع المطلوب دراسته}}$$ عامل الجودة أو RBE

وكمثال نموذجى على هذا ، اعتبر أن جرعة مقدارها 20 rd من أشعة X كانت لازمة لتسبب نفس التلف الذى تحدثه جرعة مقدارها 1 rd من جسيمات α السريعة . وكان معامل الجودة لجسيمات α السريعة هو إذن 20 . (يسمى معامل الجودة QF دائما معامل RBE وهى اختصار الفعالية البيولوجية النسبية Relative Biological Effictiveness) ويحتوى الجدول (٢٨-١) على بعض القيم التقريبية النموذجية لمعامل الجودة QF . (بالرجوع إلى أفكار القسم السابق ، هل يمكنك بصورة كيفية تفسير لماذا كان لجسيمات α تأثير اتلافى أكبر مما للالكترونات ؟)

جدول (٢٨ - ١)
القيم التقريبية لمعامل الجودة QF (أو RBE)

نوع الاشعاع	قيمة QF التقريبية
أشعة X ، الالكترونات	1.0
النيوترونات والبروتونات السريعة	10
التأثير على العين	30
جسيمات α	10-20
النيوترونات البطيئة	4-5

يمكننا من تعريف الـ rem ومعامل QF أن نكتب العلاقة التالية .

الجرعة بوحدات rem = (QF) × (الجرعة بوحدات rad) لاحظ أن وحدات QF هى rems لكل rad .

مثال توضيحى ٢٨ - ٤ : ما هو حجم جرعة النيوترونات السريعة الذى يكافىء جرعة قدرها 50 mrd من النيوترونات البطيئة ؟

طريقة الحل لنوجد أولا عدد وحدات rem الموجودة فى جرعة مقدارها 50mrd من النيوترونات البطيئة . لدينا

الجرعة بوحدات rem = (QF) × (الجرعة بوحدات rad)

حيث QF = 4.5 . ومن ثم للنيوترونات البطيئة ،

الجرعة بوحدات rem =

$$\text{Dose in rems} = (4.5 \text{ rems/rd})(50 \times 10^{-3} \text{ rd}) = 0.225 \text{ rem}$$

من الممكن الآن أن نطبق نفس المعادلة على النيوترونات السريعة وذلك بوضع QF = 10 وبوضع الجرعة بوحدات rem = 0.225 rem . ومن ثم للنيوترونات السريعة ،

$$0.225 \text{ rem} = (10 \text{ rems/rd})(\text{dose in rads})$$

مما يعطى 0.0225 rd على أنه الجرعة المطلوبة من النيوترونات السريعة .

تعريف

على أن هناك وحدة أخرى يكثر استخدامها فى وصف الاشعاع . وهذه الوحدة تسمى رونتجن (R) وتستخدم أساسا لأشعة X ، يعرف *1 R* على أنه كمية الاشعاع التى تنشىء 2.1×10^9 زوجا من الأيونات فى $1\ cm^3$ من الهواء تحت الظروف العيارية .

٢٨ - ١٣ الاتلاف الاشعاعى

حيث أن الاشعاع يستطيع تمزيق الجزيئات فإنه بهذا يكون قادراً على اتلاف المواد . وأحد الأنواع الشائعة من الإتلاف الاشعاعى يكون بسبب الأشعة فوق البنفسجية فى ضوء الشمس التى تؤدى إلى لفحة الشمس ودبغ الجلود ، حيث تقوم الفوتونات ذات الطاقة العالية بتمزيق جزيئات الجلد عند اصطدامها بها وتسبب الآثار التى تلاحظ بسهولة . ويكون الإتلاف الناشىء فى هذه الحالة على قدر ضئيل من الأهمية ، فمعظم الأشعة فوق البنفسجية للشمس تمتص فى طبقة الأوزون الموجودة فى طبقات الجو العليا ولذا لانحتاج إلى تجنب التعرض لأشعة الشمس العادية . على أننا أصبحنا ندرك فى السنوات الاخيرة أن استنفاد الأوزون من طبقته بواسطة الكيماويات التى يصنعها البشر يمكن أن تؤدى إلى وصول كميات خطيرة من الأشعة فوق البنفسجية ، وعندئذ ينشأ خطر من أن الاشعاع فوق البنفسجى المتزايد الذى يصل الينا قد يؤدى إلى ارتفاع نسبة سرطان الجلد .

الخلفية الاشعاعية

نحن نتعرض دائما لاشعاعات أخرى بالاضافة إلى ضوء الشمس ، فكل المواد تقريبا تحتوى على كميات ضئيلة من المواد المشعة ، ولهذا يتعرض

جسدك حتما لمستوى منخفض من الخلفية الاشعاعية . ويتعرض الانسان فى الغالب لخلفية أشعاعية تصل جرعتها إلى حوالى 0.15 rem كل سنة . ولنفحص الآن تأثيرات المستويات المختلفة لجرعة الاشعاع على الجسم .

الاتلاف الاشعاعى للبشر

تقوم المستويات المرتفعة للاشعاع والتى تغطى الجسم كله ، بتمزيق خلايا الدم بشكل خطير لايمكن معه الاحتفاظ بالحياة . وللجرعات التى يتعرض لها الجسم بأكمله والتى تزيد على 500 rem فإن الموت محتمل الحدوث . وحتى الجرعات التى تغطى الجسم كله وتصل إلى 100 rem يمكن أن تسبب أمراضا إشعاعية خطيرة وان كانت غير قاتلة . أما التغيرات الطارئة على الدم فتحدث عند جرعات فى المدى من 30 rem وأكثر . وعند جرعات للجسم كله أقل من هذا تكون التأثيرات الإجمالية على الجسم أقل ظهوراً ومع هذا فهى تؤدى إلى نتائج ومضاعفات خطيرة :

والجرعات الاشعاعية حتى وإن صغرت تشكل خطورة شديدة عندما تصل إلى المناطق التناسلية فى الجسم ، فالجزيئات العملاقة فى أجسادنا والتى تحمل المعلومات التناسلية يمكن أن تتمزق عند أول تصادم اشعاعى . وإذا ماتمزق عدد كاف من هذه الجزيئات فإن معلومات تناسلية مشوهة سوف تنتقل إلى الأجنة كلما استمر نموها . ونتيجة لهذا تحدث حالات وضع شاذة . وعلى الرغم من أن هناك بعض الدلائل تشير إلى أن المستوى المنخفض للحالات الشاذة فى التكاثر قد يكون مفيدا للبشرية الا أن معظم عيوب الوضع ليس مطلوبا .

ولهذا السبب يجب ألا يتعرض أى شخص فى عمر يسمح بالتناسل — لإشعاع غير ضرورى وخاصة فى منطقة الأعضاء التناسلية . ومن الطبيعى أن صورة أشعة X التى تؤخذ للذراع ، مثلا ، لاتشكل أى خطورة .

هناك إلى جانب الحالات الشاذة للوضع جانبان خطيران للمستويات المنخفضة للاشعاع . فهناك أثر سرطانى متأخر قد يكون موجودا وعلى الرغم من عدم ظهور السرطان مرة واحدة الا أن المستويات المنخفضة للاشعاع قد تجعل السرطان ينمو بعد ذلك بعدة سنوات . والخطر الثانى ينشأ من أن الأطفال عرضة للاشعاع بشكل خاص . وحيث أن الطفل ينمو بسرعة لذا فأى تبدل فى الخلايا نتيجة للاشعاع ، قد تكون له مضاعفات خطيرة . ولذا يمتنع كثير من الأطباء عن وصف المسح بأشعة X للأطفال الا فى حالات الضرورة القصوى .

وليست هناك حدود « آمنة » لتعرض الجسم للاشعاع . ويمكن فقط القول بأن الاشعاع يجب أن يظل عند أقل مستوى ممكن — داخل حدود المعقول ، فعلى سبيل المثال حيث أننا جميعا نتعرض لخلفية اشعاعية تبلغ حوالى 0.15 rem كل سنة ،

فليس هناك سبب لكي نمزق حياتنا فى تجنب جرعات اشعاعية أقل من هذه . وحتى بالنسبة لمن يعيشون فى الجبال ويتلقون جرعات اشعاعية أكبر بمقدار 0.05 rem عن أولئك الذين يعيشون عند مستوى البحر فإن الفرق ليس بالكبر الذى يضمن الانتقال . وفى التحليل الأخير فإن على الانسان أن يختار حلا وسطا بين الأمن الاشعاعى والاعتبارات الأخرى ، وعلى الرغم من هذا فالحد الأقصى للجرعات الاشعاعية المهنية قد قنن وحدد . وكقاعدة تقريبية تكون الجرعة السنوية القصوى فيما عدا للعينين والاعضاء التناسلية — حوالى 15 rem .

١٨ — ١٤ الجسيمات الأساسية

لقد قدمنا فى هذا الكتاب حتى الآن قوانين الطبيعة الواضحة تماما ونتائجها . وعلى الرغم من أننا كنا نشير من آن إلى آخر إلى بعض مواطن الريبة الا أن هذه المواطن سطحية فى الغالب . ومع هذا فسننتقل الآن إلى موضوع حافل بالريبة والتخمين . وهو موضوع الجسيمات الأساسية التى تتواجد فى الطبيعة .

لقد كان الأمر يبدو بسيطا منذ حوالى نصف قرن . فقد كنا نعرف الالكترون والبروتون والنيوترون والفوتون . وهذه الجسيمات كانت تعتبر وقتها هى الجسيمات الأساسية فى الكون ، ولكن بمرور السنين اكتشف الكثير من الجسيمات . فقد قامت المعجلات العملاقة بقذف بعض الجسيمات بالبعض الآخر بكميات تحرك مذهلة ، وقد نتج عن ذلك انتاج (أو خلق) أنواع كثيرة من الجسيمات الجديدة التى تتراوح كتلة السكون لها بين الصفر وعدة وحدات كتلة ذرية وتتراوح أعمار النصف لها من أقل من 10^{-6} S إلى مالا نهاية ، ونكاد نوقن من أن جسيمات أخرى سوف تكتشف فى المستقبل .

وليس لدينا فى الوقت الحاضر أية براهين مرضية لتفسير هذه الجسيمات . فهناك نظريات تثبت العلاقات المتبادلة بين هذه الجسيمات إلا أن سرعة تواتر الاكتشافات لم تدع نظرية واحدة مقبولة لفترة طويلة دون أن يطرأ عليها تغيير أو امتداد ، ويمكن تكوين فكرة جيدة عن الموقف الراهن بالرجوع إلى مقال حديث حول الموضوع ويمكن قراءته * . وقبل أن تنتهى من قراءته ربما يكون قد أصبح قديما ولا يصلح .

وعلى الرغم من هذه الفوضى إلا أن هناك بعض النتائج المعروفة بأنها ذات أهمية ، وتتضمن هذه النتائج حقائق أساسية صالحة للتطبيق على جميع الجسيمات . ولابد لنظرية نهائية — أو على الأقل مقبولة إلى حد ما — حول هذه الجسيمات أن تستفيد من هذه الحقائق ولنحاول أن نتعرف على هذه الحقائق الأساسية .

---

* S. L. Glashow, Quarks with Color and Flavor, *Sci. Am.*, October 1975, p. 38.

١ – تخضع جميع الجسيمات لقوانين بقاء الطاقة وكمية التحرك الخطى والشحنة . وعندما تنحل الجسيمات إلى جسيمات اخرى أو عندما تتكون جسيمات جديدة أثناء تفاعل نووى فإن هذه القوانين ستظل صالحة .

٢ – تخضع جميع الجسيمات لقانون بقاء كمية التحرك الزاوى ، أى أن التدويم باق . وعلاوة على ذلك فالتدويم مكمى . يمكن للجسم أن يتخذ كمية تحرك زاوى (مصورا على أنه نتيجة لحركة التدويم حول محوره) قيمته $s(h/2\pi)$ حيث .. $s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, ..$ ...أما h فهو ثابت بلانك . ويطلق على s تدويم الجسيم ويحتفظ كل جسيم بنفس قيمة s الخاصة به دائما . فبالنسبة للالكترون والبروتون والنيوترون تكون $s = \frac{1}{2}$. وهذه الجسيمات تسمى جسيمات ذات تدويم $\frac{1}{2}$. أما الفوتون فتدويمه $s = 1$ والميزونات لها تدويم صفرى وهكذا . وفى أية عملية فإن كمية التحرك الزاوى للمواد الداخلة فى التفاعل يجب أن يساوى تلك التى للنواتج .

٣ – العدد الباريونى (Baryon number) باق (محفوظ) . تسمى الجسيمات التى لها تدويم قدره $\frac{1}{2}$ وكتلتها مساوية أو أكثر من كتلة البروتون **باريونات** . ولكل باريون عدد هو اما $+1$ أو -1 يختار تبعا لطريقة ستوصف فى الفقرة التالية . وفى أية عملية ، يجب أن يكون العدد الباريونى فى البداية هو نفسه عند النهاية .

٤ – لكل جسيم ، جسيم مضاد ، أى أنه لكل جسيم يوجد اخر يكون « مطابقا له ولكنه مضاد » . فالالكترون ليس موجودا فحسب وإنما مضاد الالكترون أيضا موجود ، ويطلق عليه بوزيترون وهو جسيم له نفس كتلة الالكترون وشحنته مخالفة وهى $+e$. وعندما يلتقى الكترون وبوزيترون يلاشى كل منهما الآخر . والبروتون أيضا له جسيم مضاد وهو البروتون المضاد وكذلك فالنيوترون يقابله المضاد وهكذا . وعند اختيار العدد الباريونى تحظى الجسيمات بالعدد $+1$ أما الجسيمات المضادة فيكون من نصيبها العدد -1 .

٥ – تخضع كل الجسيمات ذات التدويم $\frac{1}{2}$ لإحصائيات فيرمى ديراك ونعنى بهذا أنه لا يوجد جسيمان من هذه الجسيمات بنفس مجموعة الأعداد الكمية فى أية مجموعة . ويفضى بنا هذا فى حالة الكترونات الذرة إلى مبدأ باولى للاستبعاد الذى سبقت مناقشته . على أن مبدأ الاستبعاد ينطبق أيضا على جميع الجسيمات ذات التدويم $\frac{1}{2}$ التى توجد داخل النواة وكذلك فى التجمعات المختلفة للجسيمات .

هناك بالاضافة إلى هذه الحقائق ، حقائق أخرى ولكنها ليست بعد بنفس الدرجة من اليقين ، فقد اقترحت بعض الكميات (المحفوظة) الباقية مثل ، الغرابة (Strangeness) والتدويم النظائرى (Iso Spin) . وعلى الرغم من الصعوبة الكامنة فى حل مشاكل الجسيمات الأولية إلا أن الفيزيائيين لم يفقدوا مرحهم فربما ، وبدون وعى

منهم. وعلى سبيل الاحتفاظ بالروح العالية يقومون بوصف خواص الجسيمات بمصطلحات غريبة مثل « الغرابة » «Strangeness» و « الرقية أو الفتنة » « Charm » و « اللون » «Color » وهكذا. وعلى الرغم من هذا فمساعيهم هى أعلى مستوى للابحاث وجهدهم هو الجهد الأوفر . فدراسة الجسيمات الأساسية تسير أعمق أغوار كوننا ونتوقع ظهور وسيلة فعالة لاعادة الترتيب والنظام إلى حالة الفوضى الراهنة .

ملخص

تحتوي نواة ذرة ما عددها الذرى Z وكتلتها الذرية A على Z بروتونا و $A-Z$ نيوترونا . ويعطى نصف قطرها بالعلاقة التقريبية $R = 1.2 \times 10^{-15} A^{1/3}$ m

وعلى المستوى الذرى ، تكون كتلة ذرة الكربون 12 هى 12u تماما ، أما كتل البروتون والنيوترون فقريبة جدا من 1.0u .

تمثل نواة عنصر ما X عدده الكتلى A وعدده الذرى Z بالرمز $^{A}_{Z}X$. وتكون للنواتان اللتان لهما نفس Z وتختلفان فى A نظيران لنفس العنصر وهما يعملان بنفس الطريقة فى التفاعلات الكيميائية وإن كانا يختلفان فى عدد النيوترونات الموجودة بنواتيهما . وكتل النظائر (بوحدات الكتل الذرية) قريبة من الاعداد الصحيحة أما الكتل الذرية المذكورة فى الجدول الدورى فهى متوسطات النظائر الموجودة فى الطبيعة .

لجميع النوى كتل أقل من مجموع الكتل المكونة لهذا النوى من نيوترونات وبروتونات. وكمية الكتلة Δm المفقودة فى تكوين النواة ترتبط بطاقة الترابط (ط . تر) للنواة خلال العلاقة

ط . تر = $\Delta m\, c^2$. وفى الواقع يجب أن تخلق هذه الكتلة المفقودة عندما تنفصل النواة إلى أجزاء متناثرة .
تمتاز نوى العناصر التى لها Z متوسطة بأن طاقة الترابط لكل نوية تكون أقصى ما يمكن ولهذا تنطلق الطاقة فى تفاعلات الانشطار والاندماج . تستخدم المفاعلات النووية تفاعلات الانشطار فى توليد الطاقة .

تكون جميع العناصر التى لها $Z > 83$ ذات فعالية إشعاعية وتتبع عند انحلالها قانونا أسيا . ويسمى الوقت الذى يستغرقه نصف النوى لكى ينحل بعمر النصف . وهو يعطى بالمعادلة ، عمر النصف = $0.693/\lambda$ حيث λ هى ثابت الانحلال . وعدد النوى ΔN الذى ينحل خلال فترة زمنية مقدارها Δt يرتبط بعدد النوى N القابل للانحلال بالمعادلة $\Delta N = \lambda N \Delta t$.

وتصدر المواد المشعة الموجودة فى الطبيعة جسيمات α و β وكذا أشعة γ ، وجسيمات α هى نوى هليوم ، أما جسيمات β فهى الكترونات وأشعة γ هى نفسها كأشعة X . ويمكن ترتيب هذه الجسيمات ترتيبا تنازلياً لقدرتها على التأيين وتصاعديا حسب قدرتها النفاذية كالتالى ، جسيمات α ثم β ثم أشعة γ .

تقوم القوى النووية بامساك النويات معا . وعلى عكس القوى الكهربائية وقوى الجذب فإن القوى النووية تعتبر ذات مدى قصير ، إذ أنها تؤثر على مسافات أقل من 10^{-14} m تقريبا . على أنها عند هذه المسافات تكون أكبر بكثير من قوى كولوم .

تقاس جرعة الاشعاع الممتص بدلالة وحدات تسمى راد (rad) . وهذه الوحدة أى واحد rad ، تكافىء جرعة ممتصة مقدارها 10^{-5} J فى كل واحد جرام من المادة . والجرعة معبرا عنها بوحدات rem = (الجرعة بوحدات rad) (QF) حيث يقيس عامل الجودة (QF) الفعالية البيولوجية النسبية للاشعاع المعنى .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن تذكر القيمة التقريبية لنصف قطر النواة .

٢ – أن تميز بين العدد الذرى Z والعدد الكتلى الذرى A وأن تنسبهم إلى عدد البروتونات والنيوترونات فى النواة .

٣ – أن تفسر رموزا مثل $^{6}_{3}Li$.

٤ – أن تشرح المقصود من لفظ نظير .

٥ – أن تعرف وحدة الكتل الذرية وأن تذكر الكتل التقريبية للبروتون والنيوترون بدلالة هذه الوحدة .

٦ – أن ترسم علاقة النقص الكتلى لكل نوية كدالة فى Z .

٧ – أن ترسم العلاقة بين طاقة الترابط لكل نوية و Z وأن تشرح لماذا كانت هناك علاقة بين هذا الرسم والرسم المذكور فى ٦ .

٨ – أن ترسم العلاقة بين N و t لمادة ذات فعالية اشعاعية وأن تشير إلى موقع عمر النصف على الرسم . أن تحسب نسبة المادة التى لم تتحلل بعد فترة من الزمن مساوية لعدد صحيح من أعمار النصف .

٩ – أن تعرف كل كمية فى المعادلة $\Delta N = \lambda N \Delta t$ وأن تستطيع استعمال هذه المعادلة فى مواقف بسيطة . أن تذكر العلاقة بين λ وعمر النصف .

١٠ – أن تعرف جسيم α وجسيم β وشعاع γ وكذا البوزيترون .

١١ – أن تكتب معادلة التفاعل النووى لنواة معينة تقوم باطلاق واحد مما يلى: جسيم α ، جسيم β ، شعاع γ .

١٢ – أن تعد رسما بيانيا كالذى فى الشكل (٢٨ – ٦) وذلك لمتسلسلة قد أعطيت النواة التى تبدأ بالانحلال فيها وكذا الجسيمات المنطلقة (α ، β ، γ) .

١٣ – أن تقارن بين القوة النووية وقوى الجذب وقوى كولوم من حيث الشدة والمدى واعتماد كل منها على .

١٤ – أن تشرح لماذا كان على تفاعل الانشطار النووى أن يطلق طاقة حسب الرسومات البيانية بين النقص الكتلى وطاقة الترابط . أن تذكر ما المقصود بتفاعل الانشطار المتسلسل وأن تربط هذا بسبب أن ^{235}U وليس ^{238}U هو الذى يستخدم فى القنبلة النووية .

١٥ – أن ترسم رسما بيانيا تخطيطيا لمفاعل قوى نووى مبينا قضبان الوقود ومهدىء النيوترونات وقضبان التحكم والمبادل الحرارى والخرج إلى التوربينات ، وأن تشرح وظيفة كل من هذه الأجزاء .

١٦ – أن تشرح لماذا كان على التفاعل النووى الاندماجى أن يطلق طاقة حسب الرسومات البيانية بين النقص الكتلى وطاقة الترابط . وأن تذكر لماذا كان تفاعل الاندماج أكثر صعوبة فى التنفيذ فى مفاعل معملى عن تفاعل الانشطار .

١٧ – أن تقارن بين المدى والأثر التأيينى لاشعاع α ، β ، γ حينما تمر خلال المادة .

١٨ – أن تعرف كل من الآتى : «راد » rad ، « رم » rem ، عامل الجودة (أو الفعالية البيولوجية النسبية) ، وأن تذكر المعادلة التى تربط بين هذه الكميات الثلاث . أن تستخدم هذه المعادلة فى مسائل بسيطة كالتى فى المثال التوضيحى (٢٨ – ٤) .

١٩ – أن تصف مايلى : عداد جيجر ، عداد الوميض ، الغرفة السحابية وغرفة الفقاعات .

٢٠ – أن تفسر لماذا كان الاشعاع ضارا بالبشر ، وأن تشير فى تفسيرك إلى أى أجزاء الجسم وأى أنواع البشر هم الذين يجب أن يحظوا بحماية زائدة من الاشعاع .

٢١ – أن تذكر خمسة قوانين للبقاء تخضع لها جميع الجسيمات الأساسية فى جميع التفاعلات .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

العدد الذرى Z، عدد الكتلة الذرى A .

النظير

وحدة الكتل الذرية u

النقص الكتلى ، طاقة الترابط

مشع ، عمر النصف

ثابت الانحلال ، $\Delta N = \lambda N \Delta t$

وحدة الكورى

جسيم α ، جسيم β شعاع γ ، البوزيترون .

القوة النووية

الانشطار ، التفاعل المتسلسل

المفاعل النووى

تفاعل الاندماج

راد (rad) ، رم (rem) ، (QF) أو (RBE)

يكون الاشعاع خطيرا بشكل خاص لأولئك الذين فى عمر يؤهلهم لحمل أطفال وكذا للأطفال

أسـئلة وتخمينـات

١ – ماعدد النيوترونات فى النواة $^{39}_{19}K$ ؟ وماعدد البروتونات ؟ وكم الكترونا تحتوى هذه الذرة ؟

٢ – لماذا يعتبر الكيميائيون النظائر المختلفة لعنصر ما على أنها نفس العنصر بالرغم من أن النوى ليس هو نفسه ؟

٣ – هل يمكن أن تختلف الأطياف البصرية لكل من ذرات ^{35}Cl و ^{37}Cl بشكل أساسى ؟ اشرح .

٤ – على الرغم من أن جسيم α يتجاذب مع الالكترون بدلا من التنافر معه إلا أنه قادر على تحرير الكترون من الذرة دون اللجوء إلى تصادم مباشر . اشرح .

٥ – لماذا يكون سمك معين من الرصاص أحسن امتصاصا لأشعة طاقتها 1 MeV (من جسيمات α و β وأشعة γ) من كمية من الماء لها نفس السمك ؟ لماذا يعتبر الماء حاجزا واقيا ضد النيوترونات أفضل من الرصاص ؟

٦ – للنظير ^{102}A المنتج صناعيا عمر نصف مقداره 37 min وهو ينحل بطريقتين متبادلتين . فجزء من النوى يطلق الكترونا موجبا أو بوزيترونا والجزء الباق يقوم باصطياد الالكترونات من المدار الأول لبوهر ويحتويه داخل النواة . كيف يمكن اعتبار الطريقتين متكافئتين ؟ ما الذى يمكن ملاحظته فى المعمل عند حدوث كل من هاتين العمليتين ؟

٧ – يعتبر التريتيوم ^{3}H أحد نظائر الايدورجين ، وكتلته الذرية 3.016 بينما الكتلة الذرية لـ ^{1}H هى 1.00867 ، ماالذى يمكن التنبوء به نحو استقرار التريتيوم ؟ كرر المسألة بالنسبة لـ ^{2}H ، الديوتيريوم الذى تبلغ كتلته 2.0141 .

٨ – قبل اجراء مسح بأشعة X على القناة الهضمية ، يجب على المريض أن يشرب محلولا من أحد مركبات الباريوم . لماذا ؟

٩ – عندما تلتقط صورة فوتوغرافية بأشعة X لذراع شخص ما فإن العظام ترى بوضوح فى الصورة . لماذا تظهر العظام بهذه الطريقة ؟ على الرغم من أن الذراع لايكون أسمك مايمكن حيث توجد العظام .

١٠ – حفظت كمية صغيرة من الراديوم بإحكام داخل أنبوبة زجاجية مفرغة . عندما كسرت الأنبوبة فيما بعد لفتحها وجد أنها تحتوى على بعض الغاز فقط ، وقد بين مطياف الكتلة أن الغاز يحتوى على فصائل ذات وزن جزيئى منخفض جدا وكذا على فصائل ذات وزن جزيئى مرتفع جدا . ماهذه الفصائل ؟ قدر الكثرة النسبية لهم .

١١ – تبلغ كتلة الالكترون 0.000549 بوحدات الكتل الذرية أما كتلة البروتون فتبلغ 1.00728 والنيوترون 1.00867 بنفس الوحدات . هل يكون مجديا أن يتحد الكترون وبروتون عند السكون ليكونا نيوترونا ؟ اشرح . وهل يكون الأمر ذا قيمة إذا كانا قريبين من بعضهما البعض أو على مسافة كبيرة عندما يكونا ساكنين ؟

١٢ – لماذا كان بدء تفاعل اندماجى أصعب بكثير من بدء التفاعل الانشطارى ؟

١٣ – هل توجد أية امكانية لدمج نواتين صغيرتين بدون جعلهما يصطدمان بطاقة عالية جدا ؟ برر اجابتك .

١٤ – ينتج المفاعل النووى طاقة هى بالضرورة على هيئة حرارة . اشرح كيفية تولد هذه الحرارة نتيجة للانشطار النووى .

١٥ – يظهر من تفاعلات الاندماج والانشطار أن هناك طاقة تخلق . كيف يمكن التوفيق بين هذه الحقيقة مع مقولة أن الطاقة لاتخلق ولاتفنى ؟

١٦ – من الممكن لشخص يعمل بأشعة X أن يحرق يداه بدرجة كبيرة تستلزم بترها وقد يعانى حتى بعد هذا من الكثير من المضاعفات . ومع هذا فإن مزيدا من التعرض لأشعة X قد لايسبب ضررا ملحوظا لجسم الانسان ولكنه قد يسبب تشوها خطيرا لواحد من نسله . اشرح السبب .

١٧ – يشعر كثير من العاملين فى مجال الأشعة أن النساء اللاتى فى مرحلة اليأس يمكنهن التعرض بأمان لأشعة X أكثر مما يمكن أن تحتمله امرأة صغيرة . كيف يمكن تبرير هذا الرأى ؟

١٨ – تستخدم أشعة X (اللينة) ذات الطاقة المنخفضة فى علاج سرطان الجلد ، بينما تستخدم أشعة X (القاسية) ذات الطاقة العالية فى علاج السرطان الموجود داخل عمق الجسم . لم لاتستخدم أشعة X اللينة للغرض الأخير على الرغم من أنها تستطيع أن تنفذ بسهولة إلى مناطق السرطان لقتلها ؟

مسـائـل

١ – (أ) قدر نصف قطر البروتون و (ب) عين متوسط كثافته بوحدات الجرام لكل سنتيمتر مكعب .

٢ – أحسب نصف القطر التقريبى للنواة ^{235}U وكذا كثافتها بوحدات الجرام لكل سنتيمتر مكعب .

٣ – فى مطياف للكتلة كالذى فى الشكل (٢٨ – ١) وجد أن r لذرة ^{12}C هى 10.00 cm . كم تبلغ r بالنسبة لـ ^{16}O ؟ اعتبر أن الشحنات متساوية وكذا جهود التعجيل .

٤ – يحتوى البوتاسيوم الموجود فى الطبيعة على نظيرين فقط ، وكتلة احدهما الذرية هى 38.975 ويشكل 93.4 فى المائة من المجموع ، أما الآخر وهو يشكل 6.6 فى المائة فكتلته 40.974 u . احسب من هذه البيانات الكتلة الذرية التى يدونها الكيميائيون فى الجدول الدورى .

٥ – يوجد نظيران من النحاس التجارى . يشكل الأول 70 فى المائة من المجموع وكتلته الذرية 62.96 u . ويعزى الكيميائيون كتلة مقدارها 63.58 u للنحاس . ماهى كتلة النظير الثانى ؟

٦ – لجسيم α الذى يطلقه الراديوم طاقة مقدارها 4.79 MeV . احسب سرعة الجسيم .

٧ – هناك متسلسلة اشعاعية بالاضافة إلى تلك التى فى الشكل (٢٨ – ٦) وهى متسلسلة الثوريوم وتبدأ بعنصر $^{232}_{90}Th$ وتطلق على التوالى جسيم α واحد ثم جسيمان β ثم أربعة α ثم واحد β ثم واحد α ثم واحد β . ماهو الناتج النهائى لهذه المتسلسلة ؟

٨ – ماهو الكسر التقريبى الذى يتبقى من عينة من الراديوم تركت لمدة 16,000 yr ؟

٩ – تحتوى أمبولة دقيقة من غاز الرادون على 3.0×10^{12} ذرة رادون . وعمر النصف للرادون هو 3.8 days . (أ) ماهو عدد التفتتات التى تحدث فى الثانية داخل الأمبولة ؟ (ب) ماهو النشاط الاشعاعى مقدرا بالكورى لهذه العينة ؟

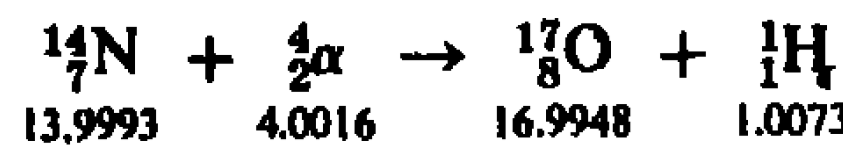
١٠ – تستخدم المواد المشعة فى الدهان الذى تدهن به الأرقام فى الساعات حتى يمكن رؤية الوقت فى الظلام . وقد استطاع طالب أن يقدر من قياسات بعداد جيجر أن هناك 1000 تفتت يحدث كل ثانية عند وجه الساعة . ماهو عدد وحدات كورى من النشاط الاشعاعى توجد فى الساعة ، إذا اعتبرنا قياسات الطالب صحيحة ؟

١١** – للكوبالت ^{60}Co عمر نصف مقداره 5.3 yr ماهى كتلة 1 Ci من هذه المادة ؟ (يشع ^{60}Co أشعة γ ويستخدم على نطاق واسع فى المجالات الطبية والصناعية حيث تتطلب أشعة X عالية النفاذية) .

١٢ – تبلغ كتلة أكثر نوى الليثيوم وفرة 7.014 u . باستخدام الكتل 1.0073 u و 1.0087 u للبروتون والنيوترون على الترتيب ، احسب طاقة الترابط فى الليثيوم بوحدات الالكترون فولت .

١٣ – تعرف كتلة ذرات الكربون 12 على أنها 12.00 u تماما ، فإذا ماطرحنا كتلة الكتروناتها الستة لوجدنا أن كتلة نواة ^{12}C تبلغ 11.997 u . باستخدام البيانات الواردة فى المسألة ١٢ ، احسب أقل طاقة ممكنة تلزم لتمزيق هذه النواة إلى مكوناتها من النيوترونات والبروتونات .

١٤ – باعتبار التفاعل النووى التالى



$$\underset{13.9993}{{}^{14}_{7}N} + \underset{4.0016}{{}^{4}_{2}\alpha} \rightarrow \underset{16.9948}{{}^{17}_{8}O} + \underset{1.0073}{{}^{1}_{1}H}$$

حيث تدل الأرقام على كتل النوى بوحدات الكتل الذرية . ماهى أقل طاقة يجب أن تكون لجسيمات α حتى يصبح التفاعل ممكن الحدوث ؟

١٥ – عندما تطلق نواة ما شعاع γ طاقته 2.0 MeV فما مقدار تغير كتلة النواة ؟

١٦** – يصدم نيوترون سرعته 10^6 m/s ذرة ديوتيريوم ساكنة (ايدروجين ثقيل ، $^{2}_{1}H$) صدمة مباشرة أثناء تصادم مرن تام (المرونة) . (أ) اوجد سرعته بعد التصادم . (ب) أعد المسألة لو أن ذرة الديوتيريوم استبدل بها ذرة أكسجين ، $^{16}_{8}O$ لاحظ أن النوى الخفيف هو الأكثر فعالية فى ابطاء النيوترونات .

١٧ – يمكن تقسيم الخلفية الاشعاعية فى مدينة دالاس بولاية تكساس إلى نوعين . فهناك جرعة سنوية تبلغ حوالى 30 mrd من إشعاع γ وحوالى 1.5 mrd من الجسيمات التى يبلغ QF لها 20 تقريبا . ماعدد وحدات rem التى يتعرض لها من يقيم فى دالاس سنويا نتيجة لهذه الخلفية ؟

١٨ – يعتقد بعض مراجع الثقة أن الجرعة القصوى المسموح بها لأيدى الانسان يجب أن تكون 70 rem/yr . عبر عن هذه الجرعة بوحدات rad إذا كان الاشعاع المعنى هو (أ) أشعة X ، (ب) أشعة γ ، (جـ) الكترونات سريعة ، (د) نيوترونات سريعة .

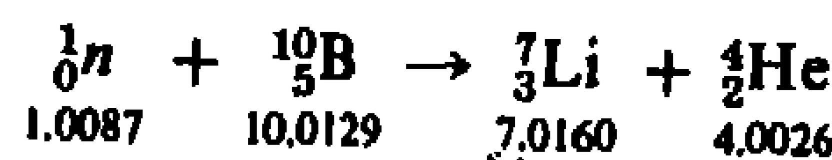
١٩** – افترض أن 1 kg من الديوتيريوم (الايدروجين الثقيل $^{2}_{1}H$) قد جمع ليكون 1 kg من الهليوم تبعا للتفاعل ،



$$\underset{2.0141}{{}^{2}_{1}H} + \underset{2.0141}{{}^{2}_{1}H} \rightarrow \underset{4.0026}{{}^{4}_{2}He}$$

حيث تبين الأرقام الكتل الذرية . (أ) مامقدار الطاقة المحررة ؟ إذا كانت الحرارة النوعية للهليوم المحصور هى 0.75 Cal/(g)(°C) فما مقدار الارتفاع فى درجة حرارته أذا أمد بهذه الكمية من الطاقة ؟

٢٠** – يتم كشف النيوترونات عادة بالسماح لها بأن تقتنص بواسطة نوى البورون . والتفاعل الذى يحدث هو



$$\underset{1.0087}{{}^{1}_{0}n} + \underset{10.0129}{{}^{10}_{5}B} \rightarrow \underset{7.0160}{{}^{7}_{3}Li} + \underset{4.0026}{{}^{4}_{2}He}$$

حيث أعطيت كتل الذرات دون أن يطرح منها كتل الالكترونات . (حيث أن عدد الالكترونات على كلا الجانبين هو نفسه فإن هذا لن يسبب أية مضاعفات . لماذا ؟) وتظهر الطاقة الناتجة من هذا التفاعل على هيئة طاقة حركة (ط .ح) للنواتج . ثم يتم عد أيونات الهليوم سريعة الحركة (جسيمات α) وذلك باستخدام الطرق العادية . احسب سرعة جسيم α باعتبار المواد الداخلة فى التفاعل ساكنة بالضرورة . تلميح : احسب الطاقة المحررة فى التفاعل ثم اكتب قوانين بقاء الطاقة وكمية التحرك .

الفصـــل التاســـع والعشرون

فيزياء الكون

عنيت الفصول السابقة بأصغر اللبنات الموجودة فى الطبيعة وهى الذرات والنوى والجسيمات الأساسية . وسنحول انتباهنا الآن إلى الاتجاه الآخر فى الموضوع وهو الكون نفسه . سنفحص فى هذا الفصل الملامح الرئيسية للكون وبعض النظريات التى تبحث فى أصله .

٢٩ – ١ الشهاب الأولى المتوهج

يهتم العلماء باكتشاف كيفية سلوك الطبيعة ؛ ثم يقومون بالربط بين هذه الاكتشافات حتى يمكن ايجاد نوع من النظام بين العديد من الحقائق التى تبدو وكأنه لاعلاقة بينها . ثم يصنع العلماء النظريات التى تفسر هذا النظام ويمضون فى اختبار صحة النظريات عن طريق التنبوء بنتائج تجارب لم تجر بعد . والنتائج العملية فى كل العلوم هى بمثابة القلب وبدونها لايكون العلم علما بل ضربا من التخمين أو الفلسفة أو اللاهوت .

وعلم الفيزياء الفلكية يواجه عوائق جمة من نقص مقدرتنا على اجراء التجارب الحاسمة حقا . وأهم الأحداث على الإطلاق وهو نشوء الكون ، قد حدث منذ العديد من بلايين السنين ولايزال مستمرا . وبالطبع لايمكن تكرار هذه العملية وكل معرفتنا عن أصل الكون يجب أن تلتقط من هذه « التجربة » الوحيدة والتى لانملك حيالها أى تحكم . بل أن كثيرا من البيانات الهامة كان من الواجب تسجيلها منذ بلايين السنين وحتى قبل ظهور الجنس البشرى . وكثيرا من المعلومات لن يصبح متاحا قبل مرور البلايين من السنين فى المستقبل . وليس لدينا بديل عن العمل بما لدينا من البيانات القليلة التى نحصل عليها بالطرق المحدودة المتاحة . ولهذا فإن معظم ما سيقال فى هذا الفصل يجب تناوله بشيء من الحرص فكثير من تفسيراتنا قد يتضح فيما بعد أنها غير صحيحة .

نظرية الانفجار العظيم

لقد كانت هناك إلى وقت قريب عدة نظريات متنافسة حول التاريخ المبكر للكون أما فى الوقت الحالى فلاتوجد إلا نظرية واحدة مقبولة على نطاق واسع وهى التى صاغها – بصورتها الحالية – ج . جامو عام ١٩٤٨ . وتسمى هذه النظرية **نظرية الانفجار العظيم** . وتصور هذه النظرية الكون كله فى البداية على أنه كان يقع داخل كرة يبلغ قطرها قدر قطر الشمس عشر مرات تقريبا . وقد يعترض البعض أن هذا محال ولايمكن حشد كل مادة الكون داخل مثل ذلك الحيز الضئيل . على أنه عند تذكر أن الذرة مكونة من فراغ ضخم فإن الحديث عن كبر حجم المادة يصبح غير ذى موضوع .

فقد تعلمنا من المسألتين ١ و ٢ فى الفصل السابق ، مثلا ، أن الكثافة داخل النواة تبلغ 2×10^{14} g/cm³ . ولما كانت التقديرات الحالية لمتوسط كثافة الكون تقع فى المدى بين 10^{-29} , 10^{-31} g/cm³ بينما يعتقد أن نصف قطر الكون قد يصل إلى 10^{10} سنة ضوئية تقريبا* ، لذا فالكتلة الاجمالية للكون من المحتمل أن تقع فى مدى

* لعلنا نذكر أن السنة الضوئية الواحدة هى المسافة التى يقطعها الضوء فى سنة واحدة ، أى 9.46×10^{15} m .

عدة عشرات من المقدار 10^{54} g . وعند حشد هذه الكتلة كلها فى حجم يبلغ عشرة أضعاف قطر الشمس سيؤدى إلى كثافة مقدارها 10^{18} g/cm³ بالتقريب وهذه الكمية قريبة من الكثافة داخل النواة (التى يمكن اعتبارها هى أيضا مكونة من فراغ ضخم) إلى درجة لايمكن معها التخلى عن المبدأ الأصلى للنظرية بناء على كبر الكثافة المتضمنة . وعند هذه القيم الهائلة للكثافة فإن المادة كما نعرفها لايمكن أن توجد ومن المؤكد أنه فى تلك المرحلة لم يكن هناك ذرات أو جزيئات أو حتى نوى ، أما الطاقة فكانت من الكبر بحيث تصل درجة الحرارة داخل الشهاب إلى 10^{12} K على الأقل . وعند هذه الطاقات الهائلة لابد أن يتمزق نوى جميع الذرات ، إذ أن طاقات الترابط تناظر شطرا صغيرا جدا من الطاقة الحرارية عند درجة الحرارة تلك .

نستطيع ، من ثم ، تصور الكون على أنه كان عبارة عن شهاب ساخن إلى أقصى درجة عند البدء (ليس هذا إلا فرضا بطبيعة الحال) . وقد كان بمثابة مرجل للطاقة والشحنة . ولو فرض أنه كانت هناك جسيمات لكانت ذات طاقات عالية جدا مما لايمكننا انتاجه إلا داخل المعجلات العملاقة . وبمعنى أو آخر يمكن تصور الشهاب على أنه غاز ساخن إلى أقصى حد وهو مكون من جسيمات وفوتونات ذات طاقات عالية ، ومثله مثل أى غاز بدأ ذلك الشهاب فى التمدد .

وعندما أخذ الشهاب فى التمدد فإن شغلا كان يبذل ضد قوى الجاذبية . كان الضغط الهائل داخل الشهاب يسبب شغلا مبذولا خلال التمدد ضد قوى الجذب الهائلة التى تمسك بأجزاء الشهاب معا . ونتيجة لهذا أخذت مادة الشهاب تفقد طاقة حركة حرارية كلما ازدادت طاقة وضع الجاذبية . وبناء عليه أخذت درجة حرارة الشهاب فى الهبوط بسرعة مع ازدياد التمدد . ومع هذا كانت عملية التمدد تقوم بتعجيل المادة المنطلقة خارجا إلى سرعات تقترب من سرعة الضوء . ولايزال الكون – حتى الآن – يبدو متمددا بسرعة تقترب من سرعة الضوء .

من الشيق أن نخمن المصير النهائى لكوننا المتمدد . فعلى الرغم من أن التمدد يتباطأ نتيجة لقوى التجاذب ، إلا أننا لانعرف مايكفى عن الكون لنحكم عما إذا كان تمدده يتم بطاقات تسمح للمادة داخله أن تكتسب سرعة الهروب المناسبة . فلو أن له الطاقة الكافية لاستمر فى التمدد إلى الأبد أما إذا لم يكن فإن التمدد لابد وأن يتوقف فى النهاية . ثم تبدأ قوى الجاذبية فى جمع شتات الكون مرة أخرى نحو شهاب أولى ملتهب كالذى بدأ به الكون . أى أنه إذا صح هذا التصور لخلق الشهاب الأولى مرة أخرى ولأعيدت العملية مرة أخرى . وفى الحقيقة ، فإن الشهاب الذى وصفناه قد يكون هو الأخير ضمن سلسلة من النبضات فى كون نابض . وقد يبدو أننا لن نستطيع

أبدا أن نعرف شيئا عن تاريخ الكون خلال النبضات السابقة حتى وإن وجدت بالفعل . هل يمكنك أن تقول لماذا ؟

٢٩ – ٢ المجرات والنجوم

عندما تمدد الكون فى الفضاء ، انخفضت درجة حرارته بسرعة إلى الحد الذى أمكن معه تكون الجسيمات . وهناك تفاعل نموذجى يمكن أن يحدث فى تلك الظروف وهو مايسمى **بالانتاج الزوجى (Pair Production)** ، حيث يتحول الفوتون إلى الكترون وبوزيترون . (وهذا هو عكس تفاعل فناء الجسيم المضاد) . هناك تفاعلات أخرى لها نفس الطابع العام حيث تتحول الطاقة – فى الواقع – إلى كتلة سكون وتخلق شحنات متساوية ومتضادة . والنتيجة النهائية – عندما يبرد الشهاب – هى تكون غاز يحتوى أساسا على البروتونات والنيوترونات والالكترونات وجسيمات أخرى ذات طاقات عالية . وحتى هذه المرحلة كانت درجة الحرارة لاتزال عالية بحيث لاتسمح بتكون ذرات الايدروجين وبالطبع لم يكن نوى الذرات الأثقل قد تكون بعد .

ويمكننا أن نحسب درجة حرارة الشهاب التى بدأ عندها تكون ذرات الايدروجين نعلم أن طاقة تأين الايدروجين هى 13.6 eV . ومن الواضح أن الطاقة الحرارية kT لا يمكن أن تكون أكبر من هذه القيمة إذا أريد لذرات الايدروجين أن تتواجد . ولما كانت 300° K تناظر $\frac{1}{40}$ eV ، فإن 13.6 eV لابد وأن تناظر درجة حرارة تقترب من 160,000 K . وعندما هبطت درجة حرارة الشهاب تحت هذه الدرجة فإنه أصبح يتكون من سحابة من غاز الايدروجين الساخن مختلطا بالنيوترونات والجسيمات الأساسية الأخرى وكما سنرى فيما يلى فإن سحابة الغاز التى تملأ الكون قد أصبحت باردة إلى الحد الذى أصبحت فيه درجة حرارتها الآن تقترب من 3 K .

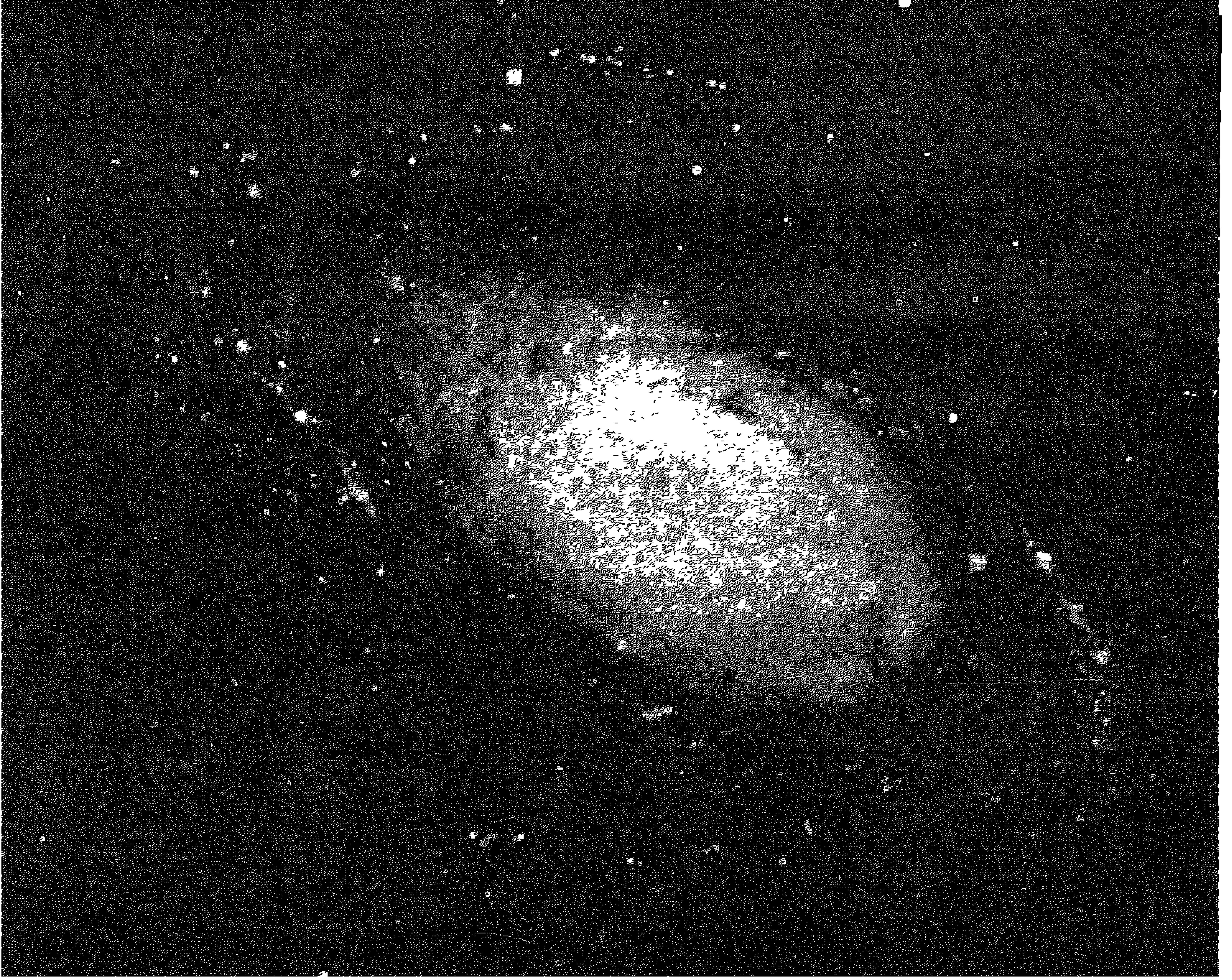
لقد ناقشنا – حتى الآن – السحابة المتمددة على أنها كيان متجانس أملس . ولم يكن الغاز – على الأرجح – موزعا بانتظام فى الفضاء ، إذ أن بعض المناطق كانت بها كثافات أعلى من الأخرى نتيجة لعوامل عشوائية ، مثل الحركة الحرارية . وعلى الرغم من عدم توفر البرهان المباشر للفرض التالى ، إلا أنه يبدو منطقيا أن المنطقة ذات الكثافة العالية – بشكل غير عادى – كانت بمثابة نقط بؤرية لما يمكن وصفه بأنه تكثف تجاذبى Gravitational Condensation وقد تكونت على امتداد أجزاء ضخمة من الفضاء قوى تجاذبية غير متوازنة جعلت المادة تبدأ فى الاندفاع نحو المناطق ذات الكثافة العالية . وقد تراكب مع هذا التأثير بالطبع – الحركة الشعاعية الدائبة للمادة وهى تخرج من سحابة الشهاب الأصلية . وهذه المناطق الهائلة غير المحكمة والتى بدأت المادة تتدافع نحوها وتتجمع أصبحت هى الآن **المجرات** الهائلة وهى نظم مكونة من تجمعات مختلفة تحتوى على الكثير من النجوم .

تكون المجرات

وعندما بدأت السحابة فى تكوين مناطق ذات كثافة عالية ، فإن الكتل المتكونة خضعت لقوانين الحركة العادية . وقد كان لأحد هذه القوانين ، وهو قانون بقاء كمية التحرك الزاوى ، أثره الملحوظ على سلوك السحابة المتكثفة . فللحصول على كمية التحرك الزاوى الأصلية $I_0\omega_0$ يجب ضرب أى كمية ضئيلة من الحركة الزاوية الصافية ω_0 -- لكتلة داخل المنطقة الضخمة التى كانت تحتلها المجرة – فى عزم قصور تلك المنطقة I_0 . على أنه عند حدوث التجمعات التى أدت إلى المجرة فإن نصف قطر الحركة التدويمية radius of gyration لكتلة المجرة أصبح أصغر بكثير وبهذا انخفضت قيمة I لأن $I \propto r^2$. وحيث أن كمية التحرك الزاوى يجب أن تكون محفوظة ، لذا $I\omega = I_0\omega_0$ وعليه فعندما تنقص I لزم أن تزداد ω . وبناء عليه فعند حدوث التكثف ، تبدأ المادة فى التدويم (Spin) حول مركز التكثف .

يكون تدويم كتلة السحابة المتكثفة أسرع مايمكن لتلك المناطق التى يكون دورانها عند البداية أكبر ولذا فلنا أن نتوقع أن يكون تدويم بعض المجرات ضئيلا جدا بينما يكون للأخرى سرعات زاوية كبيرة نسبيا (إن لفظ كبيرة فى هذا المقام يعنى ملايين من السنين فى كل دورة) ، وكشأن أى نظام به تدويم (مثل حبل مربوط به حجر أو كالبيتزا الدوارة Twirling Pizza) فإن عملية التدويم تجعل النظام يأخذ شكلا مفرطحا يشبه القرص بحيث يكون محور الدوران عموديا على مستواه . ويكون هذا التأثير أوضح مايمكن فى المجرات الحلزونية التى يكون التدويم فيها أسرع مايمكن (شكل ٢٩ – ١) . ويعتبر نظامنا الشمسى جزءا من مجرة أقل حلزونية ، وهو درب التبانة (Milky way) ، ويقع النظام الشمسى عند ثلثى المسافة تقريبا بعيدا عن مركز المجرة . (هناك مايقرب من 100 بليون نجم فى مجرتنا التى يبلغ قطرها حوالى 100,000 سنة ضوئية . ويلزم شمسنا حوالى 200 ميلون سنة لكى تدور حول مركز المجرة بسرعتها المدارية البالغة 150 mi/s تقريبا) .

وبينما تكون المجرة بأكملها لاتزال فى طور التكوين ، فإن مناطق محددة فيها تأخذ فى التكثف بسرعة كبيرة مكونة مراكز للكتلة تصبح فى النهاية نجوما فى المجرة . ومن السهل إدراك كيف يمكن أن تصبح ساخنة بدرجة عالية . عندما تجذب المادة نحو المركز بقوى الجذب فإن ط . و تتحول إلى ط . ح ويعنى هذا أن قدرا هائلا من الطاقة يحمل إلى مركز التكثف بواسطة الكتلة المتجمعة . ومن ثم تصبح درجة حرارة التجمع عالية إلى أقصى حد وتزيد فى الواقع على درجات الحرارة اللازمة للتأين الكامل لجميع ذرات الايدروجين فى التجمع . وتصبح هذه الكتلة الهائلة ، التى قد تكون أكبر عدة مرات من شمسنا ، ساخنة إلى درجة الابيضاض ، كما أنها تشبه « حساء » كثيفا جدا يسمى « **بلازما** ». وتتكون البلازما من بروتونات ونيوترونات والكترونات وجسيمات أساسية أخرى . وهكذا يكون مولد نجم .

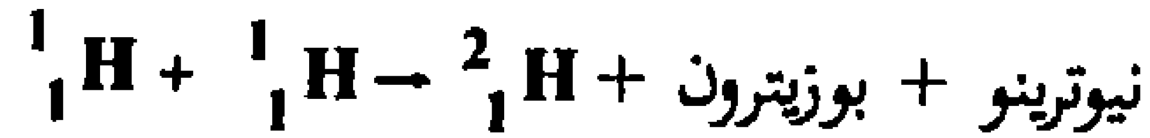


شكل ٢٩ - ١
المجرة الحلزونيـــة M 81
(صورة فوتوغرافية من مرصد
« ليك » Lick) .

٢٩ - ٢ التطور النجمى

يأخذ النجم فى التقلص كلما زاد الجذب الشعاعى نحو الداخل نتيجة لقوى الجذب حتى يتوازن ضغطه الداخلى مع الضغط الجذبى . وكما يحدث فى أى غاز فإن الضغط الداخلى يزداد بازدياد درجة الحرارة – وتكون قوى الجذب فى حالة التجمعات الصغيرة للمادة ضئيلة ولذا يتم الوصول إلى حالة من الاتزان عند درجات حرارة منخفضة نوعا ما . أما بالنسبة للنجوم الكبيرة فإن التقلص يستمر حتى تصل درجة حرارة النجم عدة ملايين من الدرجات وعند هذه الدرجة المرتفعة يصل متوسط الطاقة الحرارية للبروتون حوالى 1000 eV وعلى الرغم من الصغر النسبى لهذه الطاقة فإن بروتونات ذات طاقة عالية كافية تتواجد بحيث يصبح التفاعل الاندماجى ممكنا .

وعند المراحل المبكرة يكون التفاعل الاندماجى الهام هو



$$ {}_{1}^{1}H + {}_{1}^{1}H \rightarrow {}_{1}^{2}H + \text{بوزيترون} + \text{نيوترينو} $$

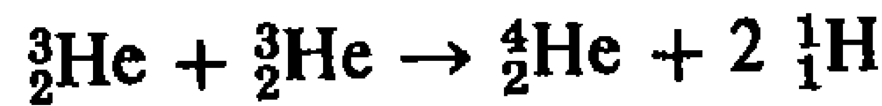
تفاعلات الاندماج فى النجـوم

حيث يعرف النيوترينو بأنه جسيم صفرى الشحنة ولاكتلة سكون له . ثم يتفاعل الديوترون ، ${}_{1}^{2}H$ مرة أخرى مع البروتون :



$$ {}_{1}^{2}H + {}_{1}^{1}H \rightarrow {}_{2}^{3}He + \gamma $$

أما نظير الهليوم ${}_{2}^{3}He$ فيتفاعل كمايلى :



$$ {}_{2}^{3}He + {}_{2}^{3}He \rightarrow {}_{2}^{4}He + 2\ {}_{1}^{1}H $$

وبصيغة أخرى يمكن القول بأن البروتونات تندمج معا فى هذا التفاعل مكونة هليوم ، فتتفاعل ستة بروتونات مكونة نواة هليوم وبروتونين . وكأى تفاعل اندماجى من هذا النوع تنطلق كميات هائلة من الطاقة . ويصبح النجم الآن قادرا على مد نفسه بالطاقة دون اللجوء إلى مزيد من التقلص الجذبى .

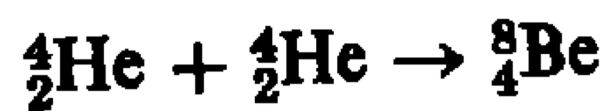
وبمجرد أن يصبح التفاعل الاندماجى من القوة بحيث يكفل زيادة الضغط الحرارى داخل النجم إلى الحد الذى يتوازن فيه الضغط الجذبى فإن النجم يستقر . وتكون درجة الحرارة عند مركز النجم – وهو أكثر المناطق سخونة ، قريبة من 15 مليون (كلفن) درجة مطلقة . وعلى الرغم من أن تفاعل البروتون على الشمس ظل مستمرا على مدى 4.5 بليون سنة إلا أن هناك – على مايبدو – مايكفى من البروتونات لكى يستمر التفاعل بنفس المعدل لفترة مساوية فى المستقبل . أما فى النجوم الأكبر من شمسنا فإن درجة حرارة باطنها تكون أكبر . (لماذا ؟) وعند تلك الدرجات الهائلة للحرارة . تصبح تفاعلات اندماجية أخرى ممكنة الحدوث .

النجوم العملاقة الحمـــراء

ولابد فى النهاية أن تستهلك تفاعلات البروتون معظم البروتونات المتاحة وبهذا يأخذ التفاعل فى الابطاء . ويتضاءل نتيجة لهذا الضغط الحرارى فيقوم الجزء غير المتوازن من الضغط الجذبى بجعل النجم يبدأ مرة أخرى فى التقلص . وحين يحدث هذا تبدأ الأجزاء الخارجية للنجم (التى كانت أبرد أولا) فى التسخين إلى درجة تبدأ معها البروتونات الموجودة هنالك فى الدخول فى تفاعلات اندماجية كالتى وصفناها من قبل . والضغط الحرارى الناتج فى هذا الجزء من النجم يجعل الطبقات الخارجية

تتمدد ، ومن ثم تكبر الأجزاء الخارجية للنجم أثناء التبريد وعند هذه المرحلة يتغير مظهر النجم من نجم ساخن إلى درجة الابيضاض إلى نجم أكبر بدرجة واضحة وأكثر احمرارا ولذا يسمى **عملاقا أحمر** .

وعلى الرغم من أن السطح الخارجي للنجم قد برد خلال هذا التحول ، إلا أن باطنه قد سخن نتيجة للتقلص الداخلي . ويكون قلبه مكونا أساسا من ^4He الذى ينتج من التفاعل الاندماجي للبروتونات . ولايبدأ الهليوم فى الاندماج إلا حين تصل درجة حرارة النجم إلى مايقرب من 100 مليون كلفن ، حيث يبدأ التفاعل التالى :



$$^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{8}_{4}Be$$

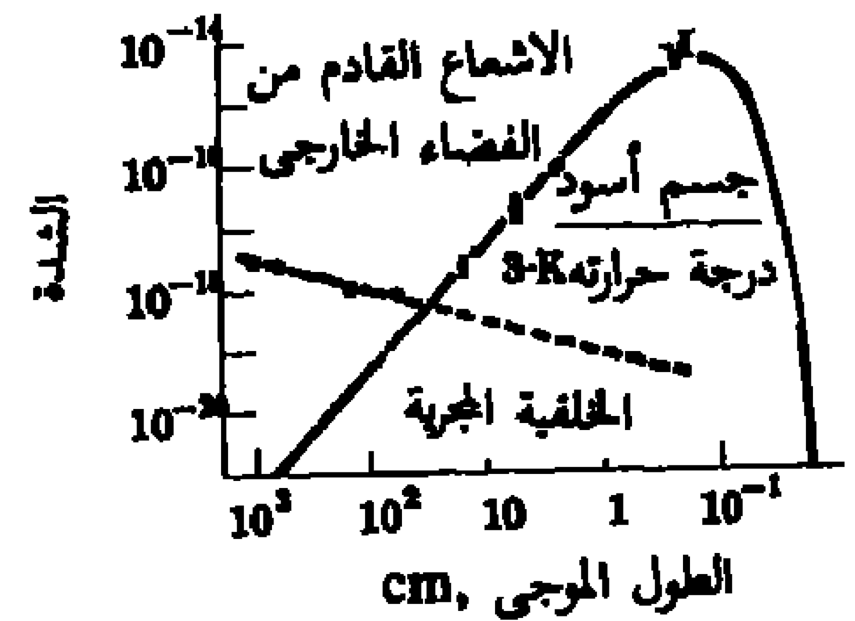
تفاعل ألفا الثلاثية

ثم يتحد البريليوم مع الهليوم :



$$^{8}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C$$

ويسمى هذا التفاعل **بتفاعل ألفا الثلاثية** وذلك لأن ذرة الهليوم المنتزعة هى جسيم α وليست المراحل المتقدمة للتطور مؤكدة ولكن التجارب المعملية التى تستخدم فيها معجلات ضخمة قد بينت أن التفاعل بين ^{12}C والجسيمات الأخرى ذات الطاقة العالية فى النجم يمكن أن تؤدى إلى تكوين نوى أضخم .



درجة حرارة الفضاء

يمكننا اعتبار الكون بأجمعه على أنه يشبه باطن فرن هائل ، وتكون درجة حرارة الفرن هى متوسط درجة حرارة الكون . وكما رأينا فى الفصل السادس والعشرين فإن الاشعاع الصادر عن جسم أسود يعتمد فيه الطول الموجي بطريقة مميزة على درجة حرارة الجسم الأسود . وبمعرفة توزيع الأطوال الموجية للاشعاع الكهرمغناطيسى الذى يصلنا من الفضاء الخارجى ، يمكننا تحديد درجة حرارة الفرن المحيط بنا ، ألا وهو الكون . وتشير البيانات التجريبية المتاحة حاليا إلى أن متوسط درجة حرارة الكون يقترب من 3 K وهذا مايوضحه الشكل المبين حيث تمثل النقط البيانات بينما يمثل الخط ما يمكن التنبؤ به لجسم أسود 3-K طبقا لقانون بلانك للاشعاع . ويكون موقع القيمة العظمى على منحنى الشدة عند طول موجى قرب 1 cm ، وهو فى مدى الأمواج الدقيقة (microwaves) أو أمواج الرادار القصيرة . وتتسم القياسات فى هذا المدى بالصعوبة البالغة لسببين : (١) أن الأجهزة المطلوبة تقع بالقرب من حدود الأجهزة المتاحة للكشف الالكترونى ، (٢) أن جو الأرض يمتص الاشعاع فى هذا المدى من الأطوال الموجية بشكل عظيم مما يجعل من المستحيل الحصول على نتائج يعتمد عليها فوق سطح الأرض أما إذا أقيم مرصد فوق سطح القمر أو فى الفضاء فإن هذه الصعوبة يمكن التغلب عليها . على أننا نجد أن البيانات المتاحة حاليا تقترح بشدة أن متوسط درجة حرارة الكون تقترب من 3 K .

وفى الواقع يبدو محتملا أن العناصر المستقرة فى الجدول الدورى قد تكونت عند هذه المرحلة من حياة النجم . وحيث أن شمسنا والكواكب تحتوى جميعها على كميات – يمكن مقارنتها ببعضها البعض – من العناصر الثقيلة ، فإن الحل لمرحلة التطور التى مر بها نظامنا الشمسى يكمن هنا .

النجوم القزمة البيضاء

ولابد فى نهاية الأمر أن تخمد التفاعلات الاندماجية فى باطن العملاق الأحمر – عندما تنفذ كمية الوقود المتاحة ، وعندئذ لاتصبح قوى الجذب متوازنة بما يكفى من الضغط الحرارى ويأخذ النجم فى التقلص ، كما أن حرارته ترتفع أكثر فأكثر نظرا لتحول طاقة الوضع إلى طاقة حرارية . وبعد عدة عشرات من ملايين السنين يكون النجم قد تقلص إلى جسم كثيف جدا وساخن إلى درجة الابيضاض ويطلق عليه **قزم أبيض** .

ولدينا أسباب نظرية جيدة للاعتقاد بأن القزم الأبيض لايمكن أن يكون مستقرا إذا زادت كتلته عن 1.2 مرة قدر كتلة الشمس . وعلى الرغم من نقص البرهان الحاسم لهذا الفرض – لأننا لانعرف سوى كتل عدد قليل من الأقزام البيضاء تم تحديدها عمليا – الا أن البيانات المتاحة لاتتناقض معه . ومع هذا فحيث أن كثيرا من العمالقة الحمر لها كتل أكبر بكثير من الكتل المذكورة فإنها يجب أن تفقد من كتلتها بشكل ما عندما تتقلص لتصير أقزاما بيضاء ، ولايعرف حتى الآن كيف يتم هذا الأمر بدقة .

واحدى الامكانيات التى تتفق مع ماهو مشاهد هى أنه خلال عمليات رصدت على أنها نجم مستعر (nova) أو نجم متفجر فائق التوهج (supernova) كان العملاق الأحمر المتقلص يمر بإنفجارات متعددة عند اقترابه من مرحلة القزم الأبيض . وتقوم هذه الانفجارات بارسال كتل ضخمة من الغازات المكونة من نوى نحو الفضاء . ونتيجة لهذا تكتسب المجرة سحابة مكونة أساسا من ايدروجين وهليوم كما أنها تحتوى على نوى عناصر أثقل . ويمكن بعد ذلك لهذه السحابة أن تمر بعملية تكثف جذبى وبهذا تتكون نجوم جديدة . وبناء على هذا يمكن لكل العملية التى وصفناها فيما سبق لتطور النجوم أن تتكرر . ولو كان لنا أن نعتقد فى هذا الفرض لبدت شمسنا كنجم من هذا النوع إذا أنها تحتوى على نوى عناصر ثقيلة ، وفى نهاية الأمر (ربما خلال ٤ أو ٥ بلايين من السنين) ستصبح شمسنا عملاقا أحمر ؛ وبعد ذلك عليها أن تتقلص حتى تصبح قزما أبيض . ومن الطبيعى أنه خلال مرحلة العملاق الأحمر ستكون الأرض قد أصبحت من السخونة بحيث لاتصلح لسكنى البشر .

٢٩ - ٤ الكون المتمدد

تعتبر نظرية الانفجار العظيم أن الكون يتمدد . فإذا كان الأمر كذلك فإن علينا أن نلحظ تأثير دوبلر فى ضوء النجوم المتراجعة . لنحسب العلاقة بين الطول الموجى لخط فى طيف الايدروجين مثلا ، صادر من مصدر على الأرض وليكن λ_0 إذا ماقورن بالطول الموجى المرصود لمصدر فوق نجم . وافترض أن النجم يتراجع بعيدا عن الأرض بسرعة v

أعتبر الآن قمة الموجة التى يبتعثها مصدر النجم . ستنتقل هذه القمة نحو الأرض مسافة قدرها ct فى زمن مقداره t ، حيث c هى سرعة الضوء على أن المصدر النجمى سيقوم بابتعاث قمة الموجة مرة كل τ_0 ثانية طبقا لجهاز توقيت موجود على النجم . وطبقا للنظرية النسبية فإن هذا الزمن τ_0 سيكون فى الواقع $\tau_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$ إذا ماقيس بواسطة ساعة أرضية . ونتيجة لهذا فإن المسافة التى ستقطعها القمة الأولى خلال الفترة بين ابتعاثها وابتعاث القمة التالية لها هى (طبقا لمشاهد أرضى) .

$$\text{المسافة} = ct = \frac{c\tau_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

وخلال هذه الفترة سيكون المصدر النجمى قد انتقل مسافة قدرها vt أى أن القمة الثانية ستبعد فى الواقع خلف القمة الأولى مسافة قدرها $ct + vt$. وتكون هذه المسافة فى الواقع ، هى الطول الموجى الذى سيرصد من على الأرض ، أو

$$\lambda = ct + vt \qquad \text{أو :} \qquad \lambda = \frac{(c+v)\tau_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

ولكن حيث أن المصدر النجمى نفسه يعتبر نظاما قصوريا (inertial system) لذا وجب أن تنطبق هنا أيضا القوانين العادية . ومن ثم $\tau_0 = \lambda_0/c$ وعلى ذلك فإن الطول الموجى لخط الطيف النجمى كما يرصد من على الأرض يرتبط بالطول الموجى للخط الصادر من مصدر ساكن ، بالعلاقة التالية :

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 + v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

---

* لو قارنت هذه العلاقة بمعادله تأثير دوبلر فى حالة الصوت والتى حصلنا عليها فى الفصل الخامس عشر لوجدت أنهما مختلفتان ومع هذا فعند قيم منخفضة للمقدار v/c حين تكون التأثيرات الناتجة عن النسبية مهملة فإن المعادلتين تتفقان .

من هنا نجد أن λ أكبر من λ_0 . وبعبارة أخرى ستبدو الأطوال الموجية لخطوط الطيف الصادرة من نجم يتراجع وكأنها قد استطالت ، أى زحزحت من الأزرق نحو الأحمر . وهذا مايشار اليه عادة **بالزحزحة الحمراء** .

الزحزحة الحمراء

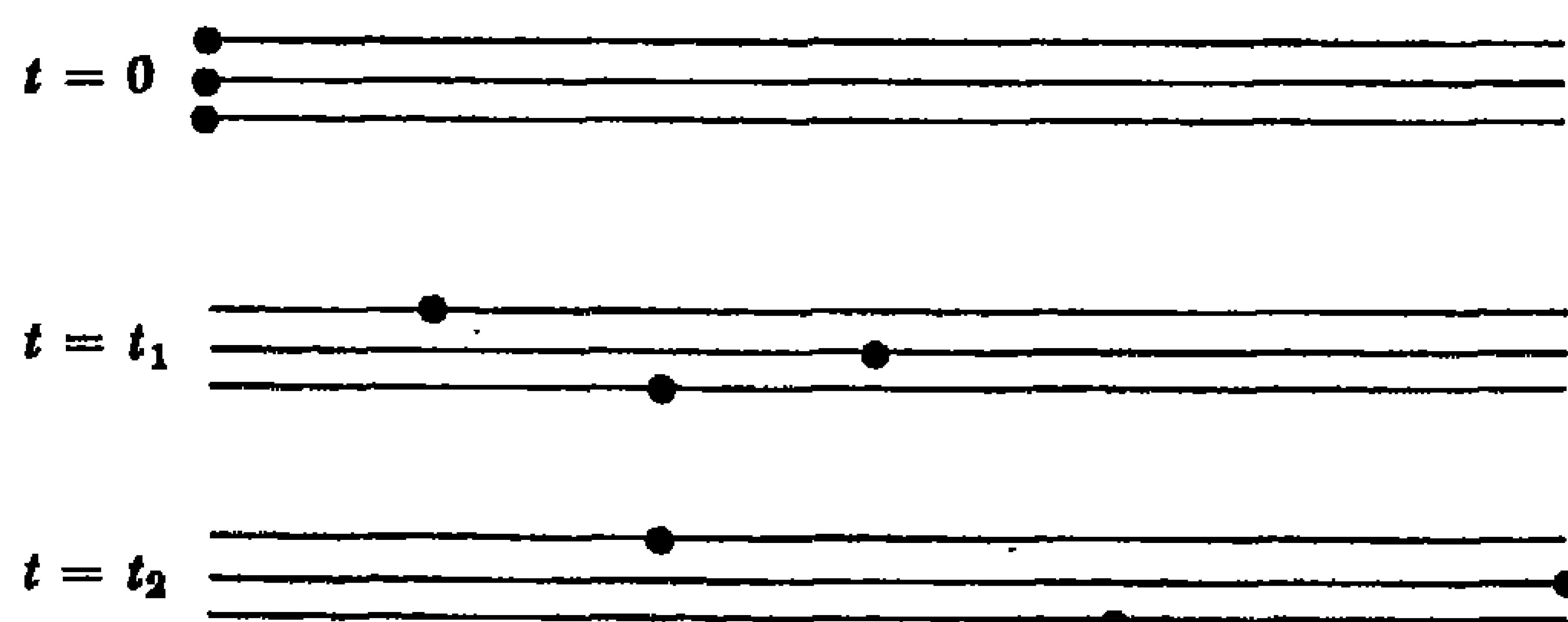
ولو أننا فحصنا الضوء الذى يصلنا من النجوم لوجدنا بالفعل أن الأطوال الموجية التى تبتعثها الذرات قد زحزحت نحو الأحمر ، ويفسر هذا على أنه يعنى تراجع جميع النجوم بعيدا عنا . باستخدام معادلة الزحزحة الحمراء ، من الممكن حساب سرعات التراجع للنجوم . وقد وجد أنه كلما بعد النجم عن الأرض كلما زادت سرعة تراجعه بعيدا عنها . ولذا فللنجوم البعيدة جدا تصبح v قريبة جدا من c ، سرعة الضوء . ولتلك النجوم تزحزح الخطوط الزرقاء نحو مادون الحمراء .

وقد وجدت علاقة تجريبية بسيطة بين سرعة التراجع v لنجم ما وبعده عن الأرض s وهذه هى :

$$s = 3.6 \times 10^{17} v \quad \text{m}$$

ولنحاول الآن تفسير هذه العلاقة فى اطار نظرية الانفجار العظيم وسنجد أنها تتيح لنا حساب عمر الكون .

تعتبر الأرض طبقا لنظرية الانفجار العظيم جزءا من السحابة المتمدده والتى أصبحت الآن باردة تماما . ومن خصائص النظام المتمدد أن كل شيء بداخله ينفصل عما عداه كما هو مبين فى الشكل ٢٩ — ٢ . فلو أن جسمين يتحركان على طول نفس الخط ولكن بسرعتين مختلفتين v_1 ، v_2 لانفصلا بسرعة تبلغ $v_2 - v_1$. ولو افترضنا أنهما بدءا من نفس النقطة عندما كان الزمن $t = 0$، أى عند الانفجار الأول للشهاب ، لأصبحت المسافة التى تفصلهما هى :



شكل (٢٩ — ٢)
إذا بدأت النقط من نفس الموقع وفى نفس اللحظة فإنها تتراجع عن بعضها البعض نظرا لتباين سرعاتها .

$$s = (v_2 - v_1)t$$

ولكن هذه العلاقة شبيهة وتنطبق فى الشكل مع العلاقة التجريبية التى وجدت من بيانات الزحزحة الحمراء وهى ،

$$s = (v)(3.6 \times 10^{17})$$

ومن تعريفنا للكمية $v_2 - v_1$ نجد أنها هى نفسها v ومن ثم يكون لدينا ،

$$t = 3.6 \times 10^{7}\,\mathrm{s} = 1.1 \times 10^{10}\,\mathrm{yr}$$

عمر الكون

على أنه هو الزمن الذى انقضى منذ الانفجار الأول للشهاب وحتى الآن . وهذا مايعطينا عمرا قدره ١١ بليونا من السنين للكون . وعلى الرغم من أن هذا العمر قد أمكن الوصول اليه من افتراضات أخرى تجريبية ، الا أن هناك من البيانات الأخرى مايعمل على تدعيمه ولو بطريقة تقريبية . وأحد الأدلة المدعمة يرد فى القسم التالى .

٢٩ – ٥ تحديد العمر من النشاط الاشعاعى

يعتبر أمرا بسيطا من حيث المبدأ أن تحدد عمر صخرة أو مادة ما إذا كانت تحتوى على مادة مشعة إلى جانب نواتج انحلالها . فهناك ، على سبيل المثال ، عند أماكن عديدة على ظهر الأرض صخور لازالت تحتوى على كميات محسوسة من ^{238}U . وعمر النصف لهذا العنصر هو 4.5 بليون سنة وينحل حتى يصل إلى الناتج النهائى وهو ^{206}Pb وهو أحد النظائر الأقل وفرة للرصاص وهو يوجد مختلطا مع ^{238}U .

ويحدث أننا نجد على ظهر الأرض كمية من ^{238}U فى الصخور بقدر مانجد ^{206}Pb ولذا كان علينا أن نستنتج أن نصف اليورانيوم قد انحل إلى رصاص فى الفترة التى انقضت منذ تكون الصخور . وعند ملاحظة أن نصف اليورانيوم هو الذى انحل ، فإننا نخلص إلى أن الصخر يبلغ من العمر ما مقداره عمر نصف واحد لليورانيوم ^{238}U أو 4.5 بليون سنة* . وهذا يعطينا الزمن الذى انقضى منذ بردت الأرض بدرجة كافية تسمح للصخور أن تتجمد عند سطح الأرض . ويمكن معرفة عمر الأرض نفسها إذا ماعرفنا كيفية تكون الأرض وهذا مالا نعرفه على وجه اليقين . وتتفق جميع العناصر الطبيعية المشعة الأخرى والتى تستخدم فى تحديد عمر صخور الأرض – إلى حد منطقى مع النتيجة التى أوجدناها سالفا .

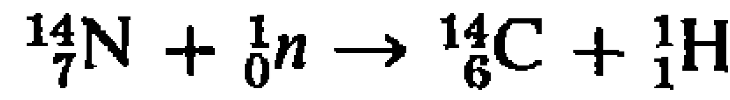
عمر الأرض

* وبدقة أكثر ، حوالى 3.9×10^{9} سنة

ويمكن أيضا استخدام طرق التأريخ الاشعاعى لتأريخ المواد الأصغر سنا . فالمواد التى تحوى كربونا يمكن وضعها داخل تدريج زمنى بشرط أن تكون المادة قد أتت أصلا من مصدر للحياة الحيوانية أو النباتية وتسمى هذه الطريقة **التأريخ بالكربون المشع** وهى تبنى على أساس استعمال النظير النادر ^{14}C .

التأريخ بالكربون المشـــع

تقوم الأشعة الكونية التى تضرب الاجزاء العليا من جو الأرض بتكوين ^{14}C من خلال التفاعل التالى :



$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

ويبلغ عمر النصف لهذا النظير غير المستقر 5730 yr ، ويقوم بعد تكونه بالدخول فى دورة الجو وهو على هيئة CO_2 أحيانا . تقوم النباتات بامتصاص CO_2 ودمجه فى أوراقها وانسجتها الأخرى وبهذا تحتوى الحياة النباتية على بعض ^{14}C بداخلها . وقبل بداية اختبارات القنابل الذرية كانت نسبة ^{14}C إلى ^{12}C فى النبات تصل إلى 1.5×10^{-12} ومن ثم فكل الحياةالنباتية تعتبر الآن مشعة بقدر ضئيل .

لو أن لدينا قطعة قديمة من الخشب ووجدنا بطرق دقيقة أن مابها من نشاط اشعاعى نتيجة لوجود ^{14}C يبلغ نصف ما بالأخشاب الحية حاليا ، لافترضنا أن قطعة الخشب قد ظلت ميته لزمن كاف لانحلال نصف كمية ^{14}C وحيث أن هذه الفترة هى عمر النصف 5730 yr للنظير ^{14}C فإننا نستنتج أن هذا هو عمر قطعة الخشب . ولقد استعملنا بالطبع أرقاما بسيطة فى هذه الحسابات بالرغم من أن الطريقة ليست محدودة بهذه الأرقام . ولايمكن تأريخ منتج صناعى قديم جدا بهذه الطريقة نظرا لأن نشاطه الأشعاعى قد انخفض إلى مستوى ضئيل جدا . وعلى الجانب الآخر للتدريج الزمنى فإن الجسم يجب أن يكون من القدم بحيث يكون نشاطه الاشعاعى قد انخفض – على الأقل – بما يسمح بالقياس .

كانت هذه لمحة خاطفة عن طرق التأريخ المبنية على النشاط الاشعاعى وهناك كثير من النظم الأخرى التى يمكن استخدام أحدها للتحقق من صحة الآخر . وبقدر ماتعنينا الأرض والقمر يمكننا القول بشىء من اليقين أن أعمار أقدم الصخور على كليهما تكاد تكون متساوية وتبلغ 3.9 بليون سنة .

٢٩ – ٦ أصل الأرض

على الرغم من أن عمر أقدم الصخور على الأرض قد تم الاتفاق عليه بشكل جيد على أنه حوالى 3.9 بليون سنة الا أن الظروف التى أدت إلى خلق المجموعة الشمسية والأرض تعتبر مجالا خصبا للحدس . فكما رأينا هناك سبب للاعتقاد بأن شمسنا

تعتبر حصيلة للمرحلة الثانية للتكثف ، ويبدو أنها قد تكثفت من بقايا الانفجار الذى صاحب تكون واحد أو أكثر من الأقزام البيضاء . ولو قبلنا بهذا الفرض لأمكن اقتراح عدد كبير من النظريات التى تبحث فى تكوين الكواكب . على أن أكثر هذه النظريات احتمالا هى التالية :

عندما بدأت السحابة فى التقلص لكى تكون الشمس ، فإن مبدأ بقاء كمية التحرك الزاوى استلزم أن تدور السحابة بسرعة أكبر فأكبر . ولكى تظل كمية التحرك للمجموعة الشمسية ثابتة كما هو الآن – فى حالة عدم تكون الكواكب– فإن السرعة الزاوية للشمس كان يجب أن تصبح أكبر بكثير عما هى الآن . ومن الواضح أنه خلال عملية التقلص ، ثبت من وجهتى نظر الطاقة والحركة أنه من الاجدى للسحابة الدائرة أن تنفصل إلى أجزاء محددة بينما يتقلص الجزء المركزى فقط مكونا الشمس . وقد مرت الاجزاء الخارجية بعمليات تكثف محلية مكونة الكواكب . وتتنبأ هذه الصورة بأن كل الكواكب يجب أن تدور بنفس الطريقة حول الشمس حتى تحتفظ بهذا بكمية التحرك الأصلية للسحابة والأمر فى الحقيقة كذلك .

وإذا ما استطردنا فى التحليل كما سبق عند مناقشة تكون النجوم ، فإن طاقات حرارية هائلة تتولد نتيجة لتقلص السحابة عند تكوين الشمس والكواكب . وكلما زادت كتلة الجرم كلما زادت قوى الجذب ومن ثم ارتفعت درجة حرارة الجرم المتكون . وفى حالة الشمس ، ارتفعت درجة الحرارة إلى الحد الذى يبدأ عنده التفاعل الاندماجى . أما بالنسبة للكواكب فقد كانت أقل وزنا بكثير ولذا كانت درجات حرارتها أقل بكثير من تلك التى للشمس ، بحيث كانت أقل بكثير من أن تشعل تفاعلا اندماجيا . ولسنا على يقين عما إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للأرض بدرجة كافية حتى تجعلها على هيئة منصهرة .

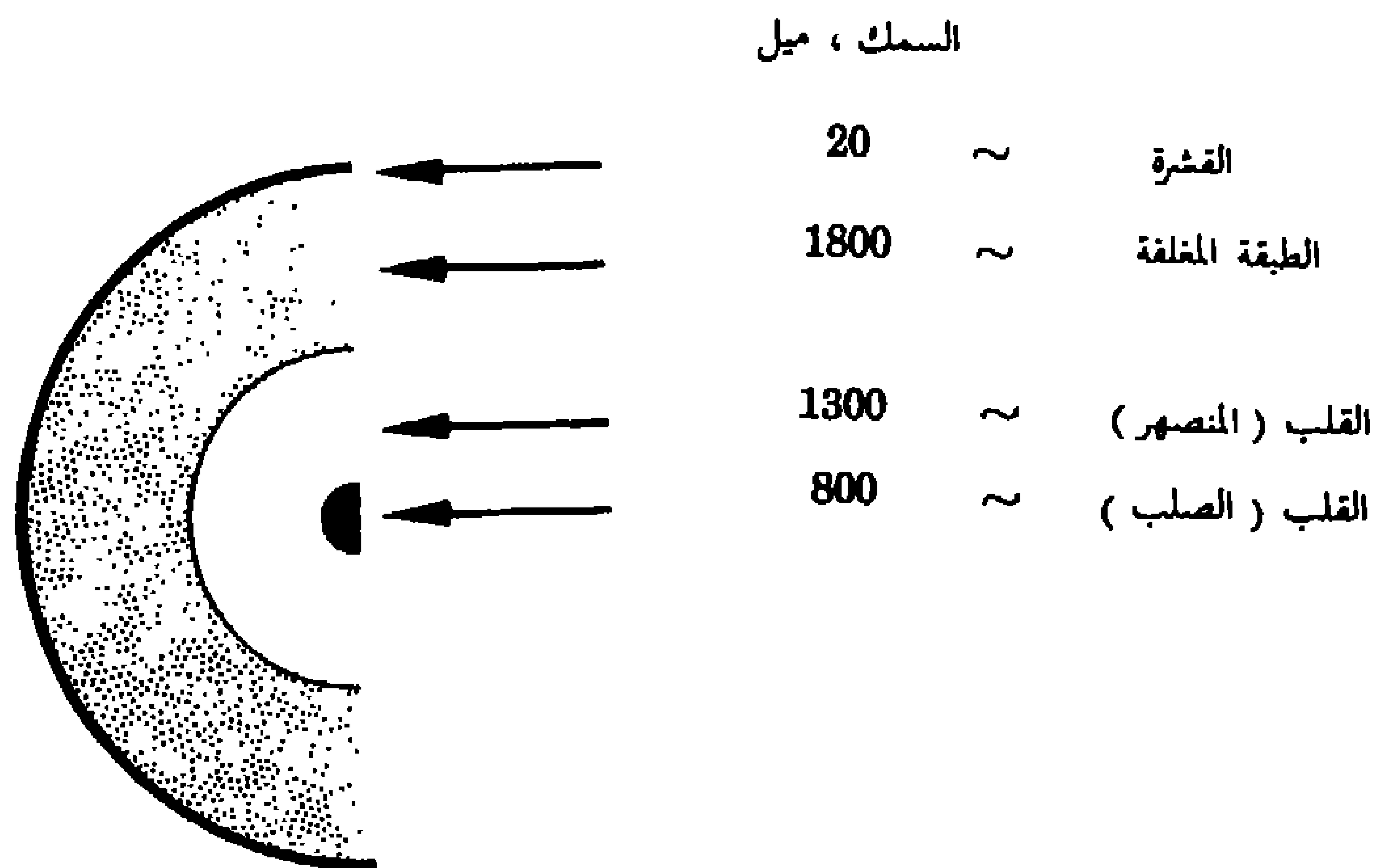
الأرض المنصهرة

هناك كثير من الادلة على أن الأرض كانت منصهرة فى احدى مراحل تطورها ولكن هذه المرحلة كانت من الأسهل أن تحدث فيما بعد . وفى الحقيقة لايزال جزء كبير من قلب الأرض منصهرا حتى الآن . ويعتقد أن درجات الحرارة المرتفعة جدا والمتولدة هناك هى نتيجة للطاقة المنطلقة خلال الانحلال الاشعاعى للكميات الضئيلة للنوى غير المستقر والتى لاتزال موجودة على الأرض . وعندما تكونت الأرض فإن النشاط الاشعاعى كان أكبر بكثير عما هو الآن ويعتقد أن الأرض ظلت فى الحالة المنصهرة لفترة من الزمن نتيجة للطاقة المنطلقة خلال الانحلال الاشعاعى .

وقد كانت الأرض تتكون فى تلك المرحلة المبكرة من جميع العناصر ، ألا أن العناصر الخفيفة كانت هى الغالبة نظر لأنها تكونت بكميات وفيرة فى الشهاب ، وحيث أن ذرات كثير من العناصر الخفيفة كانت سرعتها أكبر من سرعة الهروب عند درجة الحرارة المرتفعة تلك فإن كثيرا من الهليوم غير المتفاعل (nonreactive) تبخر بعيدا كما أن جزءا صغيرا فقط من الايدروجين الأصلى هو الذى فشل فى الهروب . وقد فقد من الأرض فى تلك المرحلة كثير من العناصر الأخرى ذات نقط الغليان المنخفضة والتى لم تتمكن من التفاعل بسهولة مع بعضها لتكون مركبات ذات نقط غليان مرتفعة . أما الجزء الرئيسى من الأرض والذى تخلف فكان مكونا من الحديد والسليكون ، الأكسجين ، المغنسيوم ، والألمونيوم . وقد يبدو من الغريب أن الأكسجين وهو غاز خفيف نسبيا قد تخلف بكميات كبيرة على الأرض . والسبب فى ذلك أن الأكسجين يتحد مع السليكون مكونا أيونات وجزيئات السليكات الثقيلة نسبيا والتى ظلت على الأرض .

بمرور الزمن ، أخذت الأرض تبرد باشعاع الحرارة نحو الفضاء ثم تماسكت قشرة الأرض ، وخلال عملية التبريد صعدت المواد الى السطح . وقد كانت هذه العملية فعالة فى تصنيف المواد داخل الأرض . ففى حين هبط الحديد والسليكون المنصهرين نحو المركز فإن السليكات والمركبات المشابهة الخفيفة تحركت نحو السطح .

لقد أصبح الموقف اليوم معروفا لدينا ولو بطريقة سطحية بالنسبة لباطن الأرض وذلك من عدة مصادر . فقد بينت الموجات التى تنعكس وتخترق الأرض بعد صدورها من مواقع الزلازل أو من الانفجارات التى يجريها الانسان ، أن سطح الأرض له قشرة رقيقة يبلغ سمكها حوالى 20 ميلا كما يوضح الشكل ٢٩ - ٣ . ويقع تحت هذه القشرة منطقة سميكة تسمى الطبقة المغلقة (mantle) وأسفل هذه الطبقة يقع القلب المنصهر الذى قد يحتوى على قلب داخلى صلب وهو صغير نسبيا . ولنتحدث عن كل فى دوره .



شكل (٢٩ - ٣)
صورة تقريبية لتركيب الأرض

يكون تركيب القشرة متباينا ولكنه يتميز بالحقيقة القائلة بأن 45 فى المائة منه على هيئة أكسجين متحد مع عناصر أخرى ، فمعظم الصخور على الأرض هى أساسا مركبات الأكسجين والسليكون كما فى السليكات وذلك بالرغم من وجود مركبات الأكسجين مع الالمونيوم والحديد والكالسيوم ، الخ .

وتمتد الطبقة المغلفة montle مايقرب من 2000 mi فى داخل الأرض تحت القشرة والطبقة المغلفة أيضا صلبة . ولازالت هذه الطبقة دافئة تستدفىء – تماما مثل القشرة – بفعل الحرارة التى تنتجها المواد المشعة فى الأرض . (أن سطح الأرض فقط هو الذى يصيبه تسخين شديد بفعل الشمس) ويعتقد أن الطبقة المغلفة تتكون أساسا من أكسجين ومغنسيوم وسليكون على هيئة المركب سليكات المغنسيوم .

وعلى الرغم من أن درجة الحرارة فى الطبقة المغلفة السفلى تصل بها إلى درجة الاحمرار الا أن المادة واقعة تحت ضغط هائل وهى فى الحالة الصلبة .

يقع القلب المنصهر تحت الطبقة المغلفة ويمتد إلى مركز الأرض تقريبا وهو مكون أساسا من الحديد (هكذا نعتقد) على أنه قد يحتوى على كميات محسوسة من النيكل والسليكون أيضا . وتفترض نظرية معاصرة أن هناك تيارات كهربائية تسرى خلال القلب المعدنى المنصهر وأن هذه التيارات يظن أنها سبب المجال المغناطيسى للأرض . على أن كل هذه العمليات لاتعدو كونها تخمينية .

أن معرفتنا للأرض مازالت فى حالة يرثى لها من عدم الاكتمال ويزيد على هذا أن القمر والكواكب الأخرى أقل حظا من معرفتنا . وحتى كتابة هذا الكتاب وبالرغم من الانزالات الحديثة الا أنه ليست لدينا نظرية مقبولة عن أصل القمر . أما تركيب وتاريخ الكواكب الأخرى فلازال يحوطه الغموض التام . وليس من المحتمل أن نعرف فى المستقبل القريب الخصائص الكاملة للقمر وذلك نظرا لما نعانيه من نقص فى فهمنا للأرض نفسها . ومن الواضح إذن انه لازال أمامنا الكثير نتعلمه عن مجموعتنا الشمسية .

٢٩ – ٧ نهاية البداية

تناولنا فى الأقسام السابقة لمحات خاطفة عن المجالات الواسعة للفيزياء الفلكية والأرضية. وهذه المجالات ضمن مجالات أخرى مثل الفيزياء الحيوية وفيزياء الجسيمات تعتبر جانبا ضئيلا من الموضوعات التى كنا نود أن نتمكن من مناقشتها بالتفصيل ، الا أن أى كتاب يجب أن تكون له خاتمة . وعلى الرغم من أن الفيزياء وأهميتها بالنسبة لك أكبر من أن تحتويها دفتا كتاب واحد الا أنك قد بدأت – على الأقل – فى استيعاب آفاقها فى هذا الكتاب .

وإذا مانظرنا إلى المستقبل فلعلك تعلم أن فيزياء اليوم ليست الا بداية للفيزياء التى ستعرف بعد قرون من الزمان . ونتوقع أنه فى الأعوام القادمة سوف تندمج علوم الفيزياء البيولوجيا والطب والكيمياء وعلم النفس أكثر فأكثر لتصبح علما شاملا واحدا وكلما زادت معرفتنا بالجزيئات وكيفية اتحادها معا لتكوين الخلايا ، كلما أصبح لدينا الأساس القوى لمعرفة أسس الحياة نفسها .

على أن هذا ليس الا أحد الطرق التى ستسلكها فيزياء الغد . فمعرفتنا بالكون لازالت فى مهدها ولازلنا فى بداية فهمنا لكيفية خلق الكون . وليس سلوك المجرات البعيدة وماضى ومستقبل النجوم الا مشاكل قليلة تشد اهتمام علماء الفيزياء الفلكية المعاصرين . ولايمكننا مجرد التخمين عن المنهج الذى ستسلكه ابحاثهم فى السنوات القادمة .

وبينما ينشغل البعض ببحث المراحل الشاسعة للكون فإن كثيرا من العلماء سيعكفون على اجابة الأسئلة التى تدور حول الكيانات الضئيلة جدا التى نعرفها ، فلازال فهمنا للنواة غير مكتمل . وقد بدأنا بالكاد نتعلم شيئا عن التركيب « الداخلى » للجسيمات « الابتدائية » . ويعتقد كثير من الناس أننا لن نصل أبدا إلى معرفة مايدور داخل النيوترون ، (إذا كان هناك مايدور على الاطلاق) على سبيل المثال . ويصعب علينا توقع أن يكون علماء عام ١٩٠٠ قد تنبأوا بالاكتشافات الهامة بالنسبة لفيزياء اليوم ألا وهى – الفوتون – النسبية ، والسلوك الموجى للمادة . ونحن بدورنا يمكننا التنبؤ – فقط – بأن أيام الاكتشافات المثيرة لم تنته بعد . ولعلك ستهتم بشكل مباشر بتلك التطورات ، وذلك لأنك ستعيش فى عالم يتأثر بها تأثرا عظيما وسنأمل أن تستفيد من المعرفة التى جنيتها من هذا الكتاب كأساس تبنى عليه فى المستقبل وأن تتمكن من الربط بين اكتشافات العلم واحتياجات المجتمع . فكثير من الناس يتحدث عن العلم كما لو كان وحشا سيفترس المجتمع فى نهاية الأمر وهذا طبعا أحد الاحتمالات التى يجب علينا جميعا مواجهتها علماء وغير علماء .

أننا كبشر لا نستطيع أن نخبىء رؤسنا فى الرمال ونأمل أن تتوقف الاكتشافات العلمية أو تتلاشى بسلام ، فالعلم سوف يستمر فى التقدم . أما إذا ما كان هذا التقدم سيؤدى إلى تحسن لظروف الحياة أم إلى تدمير البشرية . فهذا يرجع إلى الطريقة التى سنتفاعل بها كأعضاء فى المجتمع مع هذا التقدم . ولكى نجنى الفائدة الصحيحة من اكتشافاتنا العلمية يجب أن تتضافر جهود العالم والسياسى والفليسوف وعالم الأديان بل وكل المواطنين . ويجب أن يفهم كل منا الآخر إذا كان علينا أن نساعد بعضنا البعض فى هذه المهمة الجليلة . وحتى أولئك الذين لن يستزيدوا من دراسة

الفيزياء سيصبحون الآن أفضل استعداد لمواجهة هذا التحدى . أننا نأمل أنه بالمعرفة والفهم اللذين حصلتم عليهما من هذا الكتاب أن تتبؤوا مكانكم الصحيح فى كون الغد .

ملخص

لقد وجد كوننا – طبقا لنظرية الانفجار العظيم – منذ مايقرب من ١١ مليون سنة على هيئة كرة ساخنة إلى أقصى حد وذات كثافة هائلة . ثم تمددت تلك الكرة بسرعة وبردت . وهى لازالت تتمدد ولاندرى هل تظل مستمرة فى التمدد إلى الأبد أم أنها ستبدأ مرة أخرى فى التقلص حتى تعود إلى شكلها الأصلى .

وعندما تمدد الكون وبرد ، أدت التغيرات فى الكتلة إلى ظهور مناطق من المادة المتكثفة التى كونت المجرات ، ثم تكونت الشموس الساخنة (أو النجوم) داخل المجرات عندما ولدت المادة المنجذبة إلى داخل نقطة التكثف بقوى الجذب – حرارة نتيجة التصادم . وقد كانت درجة الحرارة المتولدة من الكبر بحيث مكنت من اشتعال التفاعل النووى الاندماجى الذى يقوم بامداد النجم بالطاقة الاضافية . وعندما يتقلص النجم ويمر بمراحل تطوره المختلفة فإن العناصر ذات الأعداد الذرية المرتفعة التى توجد فى الكون – تبدأ فى التكون وتطرد بعيدا عن النجم .

يمكن تحديد عمر الصخور القديمة على سطح الأرض من نشاطها الاشعاعى وتدل تلك القياسات على أن قشرة الأرض قد تماسكت منذ مايقرب من 3.9 بليون سنة . ففى أحد المراحل كانت الأرض منصهرة . وقد كان جزء من الحرارة اللازمة قد نشأ عن قوى الجذب التى كونتها أما الجزء الآخر فقد كان نتيجة للطاقة الناتجة عن الانحلال الاشعاعى .

ولايزال مركز الأرض منصهرا حتى الآن ويستمد حرارته من المواد المشعة .

الحد الأدنى من الأهداف التعليمية :

عند اتمام هذا الفصل يجب أن تكون قادرا على عمل الآتى :

١ – أن توضح معالم نظرية الانفجار العظيم متضمنا مايلى : الوضع الأصلى التمدد والتبريد ، تكون المجرة ، الدوران ، تكون النجم ، مصادر طاقة النجوم ، انتاج He والعناصر ذات Z المرتفعة ، ماحدث على امتداد الزمن منذ الانفجار العظيم .

٢ – أن تصف العملية التى تم بها تسخين مادة النجوم إلى الحد الذى أمكن معه اشعال تفاعل الاندماج . أن تذكر طريقة اساسية واحدة – على الأقل – تتم بها محافظة النجوم والشمس على درجة حرارتها المرتفعة .

٣ – أن تفسر كيف أن الزحزحة الحمراء تشير إلى أن الكون يتمدد .

٤ – أن تشرح كيف يمكن تحديد عمر الصخور الحاملة لليورانيوم من تحليل مكوناتها أن تذكر الفكرة الأساسية للتأريخ بواسطة الكربون المشع للمواد العضوية .

٥ – أن ترسم تخطيطيا مقطعا مستعرضا للأرض وتشير إلى الطبقات الرئيسية لها . وأن تذكر تقديرا تقريبيا لسمك القشرة . أن تذكر أى الاجزاء منصهر .

مصطلحات وعبارات هامة

يجب أن تكون قادرا على تعريف أو شرح كل من :

نظرية الانفجار العظيم

عمر الكون

المجرة

الشمس والنجوم

لعملاق الأحمر ، القزم الأبيض
.رجة حرارة الكون فى الوقت الحاضر
لزحزحة الحمراء
لقشرة ، الطبقة المغلفة ، قلب الأرض .

سئلة وتخمينات

١ – ماهى العوامل الواجب معرفتها حتى نحسب ما إذا كان كوننا سينبض أم سيتمدد إلى الأبد ؟

٢ – لم لايمكن تحديد ما إذا كان الكون قد نبض عدة مرات من قبل ؟

٣ – تشير معلوماتنا إلى أن الشهاب الأول المتوهج قد استغرق حوالى ساعة لكى يبرد إلى مدى 10^{10} k . ماهو متوسط الطاقة الحرارية kT وحدات الالكترون فولت فى ذلك الوقت ؟ قارن هذه الكمية بطاقة ترابط نواة ^4He . مالذى يمكنك قوله.

٤ – يمكننا تقدير درجة حرارة سطح الشمس عن طريق قياس العلاقة بين الضوء الصادر منها والطول الموجى . اشرح كيف يمكن عمل هذا التقدير .

٥ – نحن نعلم أن الشحنة محفوظة . هل يعنى هذا أن عدد الشحنات الموجبة والسالبة الموجودة الآن فى الكون هو نفس العدد الذى كان موجودا فى الشهاب المتوهج الأصلى ؟

٦ – حين تنظر إلى الكون ، فإننا نجد أن جميع المجرات تطير بعيدا عنا . هل يعنى هذا أننا لازلنا عند موقع الشهاب المتوهج الأصلى ؟

٧ – حيث أنه لاتوجد دلائل على وجود حياة على المجموعة الشمسية فيما عدا الأرض ؟ فإن أقرب الجيران الذى يمكن اتخاذهم يمكن أن يوجدوا فوق كوكب لأقرب نجم الينا وهو ألفا قنطورس الذى يبعد عنا مسافة 4×10^{16} m . كم من الوقت تستغرقه سفينة فضاء خالية لكى تصل إلى هناك ؟ وكم تستغرق سفينة فضاء تنتقل بسرعة قدرها $0.99c$ ؟ (ق) .

٨ – لقد تكونت الأرض منذ حوالى 5 بلايين من السنين . لماذا كانت الأرض أكثر فعالية اشعاعية بكثير عما هى الآن ؟ وهل تتوقع أن تكون أنواع النشاط الاشعاعى اليوم هى نفس ماكانت عليه قديما ؟

٩ – أننا نفترض عادة ان تسخين المادة المشعة لن يغير من عمر النصف لها . ماهى درجة السخونة فى تقديرك التى يصبح عندها هذا الفرض خاطئا (قد ترغب فى استعمال حقيقة أن الطاقة الحرارية عند 300 k تبلغ حوالى 1/40eV) . (ق)

١٠ – إذا كانت حرارة الفضاء الخارجى هى حقيقة 270°C – فلم لايتجمد الملاحون الفضائيون حتى الموت أثناء رحلات الفضاء ؟ أنهم – حقيقة – يحتاجون إلى تبريد على سطح القمر . لماذا ؟

١١ – لم لا يحتوى القمر على أى جو ؟

١٢ – تكون درجة الحرارة داخل المناجم العميقة منتظمة على مدار السنة . مالذى تشير اليه هذه الحقيقة حول مصدر الحرارة فى المنجم ؟

١٣ – لو أن درجة حرارة الشهاب المتوهج كانت 10^{12} k وكان حجمه 10^{10} m فما تقديرك لكتلة الكون إذا كان عليه أن يكون نابضا ؟ هل هذا التقدير يعتبر حدا أعلى أو أدنى ؟)

١٤ – ماهو عمر قطعة من الخشب إذا كان ماتحتويه من ^{14}C يبلغ عشر ماهو موجود فى الأشجار حاليا ؟ ماهى العوامل التى قد تجعل تقديرك خاطئا ؟

١٥ – تتلقى الأرض من الشمس طاقة بمعدل متوسط يبلغ 2 cal/(m²)(min) تقريبا . قدر كمية الايدروجين التى تتحول يوميا إلى هليوم داخل الشمس .

ملحق « ١ »

تحويل الوحدات

كثيرا مايحدث أن نريد تحويل كمية معبرا عنها بمجموعة معينة من الوحدات إلى مجموعة أخرى من الوحدات . ومن الأمثلة النموجية، قد نود معرفة عدد الكيلومترات التى تكافىء 20 mi . ولاجراء مثل هذا التحويل نستخدم عوامل التحويل . ولنحاول معرفة ماهو عامل التحويل هذا .

نعرف ، على سبيل المثال ، أن

$$100\ \text{cm} = 1\ \text{m}$$

وبالقسمة على 100 cm نجد أن

$$1 = \frac{1\ \text{m}}{100\text{cm}} = 0.010\ \text{m/cm}$$

هذا هو عامل التحويل بين الامتار والسنتيمترات . لاحظ أن عامل التحويل يساوى الوحدة . وعندما نضرب أية كمية فى عامل التحويل فكأنما ضربناها فى الوحدة أى أن قيمة هذه الكمية لن تتغير . وسنقوم الآن بعرض عدد من الأمثلة التى يستخدم فيها عامل التحويل .

١ – ماهو عدد الأمتار الموجودة فى 30 mi ؟ يمكننا الحصول على عامل التحويل المناسب من المعادلة 1.600 km = 1 mi ولذا فهو يساوى 1.60 km/mi .وحيث أن عامل التحويل يساوى الوحدة فإننا نسطيع أن نضرب به أو نقسم عليه دون أن تتغير قيمة الكمية . ومن ثم ،

$$30\ \text{mi} = (30\ \text{mi})\left(1.60\ \frac{\text{km}}{\text{mi}}\right) = 48\ \text{km}$$

٢ – ماعدد الساعات التى تقع فى 200,000 s ؟ (نعلم أن 1 h = 60 min وأن 60 s = 1 min أى أن ،

$$200{,}000\ \text{s} = (200{,}000\ \text{s})\left(\frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}}\right) = \frac{20{,}000}{6}\ \text{min}$$

$$= \left(\frac{20{,}000}{6}\ \text{min}\right)\left(\frac{1\ \text{h}}{60\ \text{min}}\right) = 55.6\ \text{h}$$

هناك عوامل تحويل نموذجية على الغلاف الداخلى لهذا الكتاب .

ملحق « ٢ »

قوى العدد « ١٠ »

كثيرا مايكون من غير المناسب أن تكتب أرقاما مثل 1,420,000,000 أو 0.00031 فنفس هذه الأرقام يمكن كتابتها على الصورة 1.42×10^{9} و 3.1×10^{-4} كما سنوضح بعد قليل .

اعتبر المتطابقات التالية

$$1 = 10^{0}$$
$$10 = 10^{1}$$
$$100 = (10)(10) = 10^{2}$$
$$1000 = (10)(10)(10) = 10^{3}$$
$$1,000,000,000 = 10^{9}$$

فلو أردنا أن نكتب الرقم 4,561,000,000 لوجدنا أن هذا الرقم مكافىء لضرب 4.561 فى العدد ١٠ تسع مرات . (فى كل مرة نضرب فى العدد ١٠ تتحرك العلامة العشرية رقما واحدا إلى اليمين) . ومن ثم

$$4,561,000,000 = 4.561\times10^{9}$$

وعلى العموم فإذا حركنا العلامة العشرية فى رقم ما عدد q رقما إلى اليسار للزم أن نضرب الرقم فى 10^{q} إذا أردنا للرقم أن يظل دون تغيير . وفى المثال السابق فإن $q=9$

وتتشابه عملية كتابة الأرقام الأقل من الوحدة مع العملية السابقة ، فنحن نستخدم حقيقة أن .

$$0.1 = \frac{1}{10} = 10^{-1} = 1 \times 10^{-1}$$

$$0.01 = \frac{1}{100} = \frac{1}{10^{2}} = 10^{-2} = 1 \times 10^{-2}$$

$$0.001 = \frac{1}{1000} = \frac{1}{10^{3}} = 10^{-3} = 1 \times 10^{-3}$$

$$0.000,000,01 = \frac{1}{10^{8}} = 10^{-8} = 1 \times 10^{-8}$$

من الواضح أنه عندما نحرك العلامة العشرية q رقما إلى اليمين فإننا يجب أن نضرب الرقم فى 10^{-q} وفى المثال الذى ذكرناه فى الأول وهو $0.00031=3.1\times10^{-4}$ كانت قيمة q هى 4 ، وذلك لأن العلامة العشرية قد حركت أربعة أرقام .

ملحق « ٣ »

الجدول الدورى للعناصر

القيم المدرجة فى هذا الجدول وضعت على أساس أن $^{12}_{6}C = 12\,u$ بالضبط بالنسبة للعناصر المنتجة صناعيا فإن الوزن الذرى التقريبى لمعظم النظائر المستقرة معطى بين أقواس .

المجموعة		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
الدورة	المتسلسلة									
1	1	1 H 1.00797								2 He 4.003
2	2	3 Li 6.939	4 Be 9.012	5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.9994	9 F 19.00		10 Ne 20.183
3	3	11 Na 22.990	12 Mg 24.31	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453		18 Ar 39.948
4	4	19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85 27 Co 58.93 28 Ni 58.71	
	5	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 70.909		36 Kr °3.80
5	6	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc [98]	44 Ru 101.1 45 Rh 102.905 46 Pd 106.4	
	7	47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90		54 Xe 131.30
6	8	55 Cs 132.905	56 Ba 137.34	57–71 Lanthanide series*	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2 77 Ir 192.2 78 Pt 195.09	
	9	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.98	84 Po [210]	85 At [210]		86 Rn [222]
7	10	87 Fr [223]	88 Ra [226]	89–103 Actinide series†						

متسلسلة للاثنانيدات	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm [147]	62 Sm 150.35	63 Eu 152.0	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
متسلسله الاكتيدات	89 Ac [227]	90 Th 232.04	91 Pa [231]	92 U 238.03	93 Np [237]	94 Pu [242]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [251]	99 E [254]	100 Fm [253]	101 Md [256]	102 No [254]	103 Lw [257]

ملحق « ٤ »

جدول مختصر للنظائر

وضعت القيم المدرجة هنا على أساس أن $^{12}_{6}C = 12\ u$ بالضبط . ضمنت كتل الالكترونات .

العدد الذرى Z ATOMIC NUMBER Z	الرمز SYMBOL	متوسط الكتلة الذرية AVERAGE ATOMIC MASS	العنصر ELEMENT	عدد الكتلة A MASS NUMBER A	التوفر النسبى ، ٪ RELATIVE ABUNDANCE %	كتلة النظير MASS OF ISOTOPE
1	H	1.00797	Hydrogen	1	99.985	1.007825
				2	0.015	2.014102
2	He	4.0026	Helium	3	0.00015	3.016030
				4	100—	4.002604
3	Li	6.939	Lithium	6	7.52	6.015126
				7	92.48	7.016005
4	Be	9.0122	Beryllium	9	100—	9.012186
5	B	10.811	Boron	10	18.7	10.012939
				11	81.3	11.009305
6	C	12.01115	Carbon	12	98.892	12.0000000
				13	1.108	13.003354
7	N	14.0067	Nitrogen	14	99.635	14.003074
				15	0.365	15.000108
8	O	15.9994	Oxygen	16	99.759	15.994915
				17	0.037	16.999133
				18	0.204	17.999160
9	F	18.9984	Fluorine	19	100	18.998405
10	Ne	20.183	Neon	20	90.92	19.992440
				22	8.82	21.991384
11	Na	22.9898	Sodium	23	100—	22.989773
12	Mg	24.312	Magnesium	24	78.60	23.985045
13	Al	26.9815	Aluminum	27	100	26.981535
14	Si	28.086	Silicon	28	92.27	27.976927
				30	3.05	29.973761
15	P	30.9738	Phosphorus	31	100	30.973763
16	S	32.064	Sulfur	32	95.018	31.972074
17	Cl	35.453	Chlorine	35	75.4	34.968854
				37	24.6	36.965896
18	Ar	39.948	Argon	40	996	39.962384
19	K	39.102	Potassium	39	93.08	38.963714
20	Ca	40.08	Calcium	40	96.97	39.962589
21	Sc	44.956	Scandium	45	100	44.955919
22	Ti	47.90	Titanium	48	73.45	47.947948
23	V	50.942	Vanadium	51	99.76	50.943978
24	Cr	51.996	Chromium	52	83.76	51.940514
25	Mn	54.9380	Manganese	55	100	54.938054
26	Fe	55.847	Iron	56	91.68	55.934932
27	Co	58.9332	Cobalt	59	100	58.93319
28	Ni	58.71	Nickel	58	67.7	57.93534
				60	26.23	59.93032

العدد الذرى Z ATOMIC NUMBER Z	الرمز SYMBOL	متوسط الكتلة الذرية AVERAGE ATOMIC MASS	العنصر ELEMENT	عدد الكتلة A MASS NUMBER A	التوفر النسبى ، ٪ RELATIVE ABUNDANCE, %	كتلة النظير MASS OF ISOTOPE
29	Cu	63.54	Copper	63	69.1	62.92959
30	Zn	65.37	Zinc	64	48.89	63.92914
31	Ga	69.72	Gallium	69	60.2	68.92568
32	Ge	72.59	Germanium	74	36.74	73.92115
33	As	74.9216	Arsenic	75	100	74.92158
34	Se	78.96	Selenium	80	49.82	79.91651
35	Br	79.909	Bromine	79	50.52	78.91835
36	Kr	83.30	Krypton	84	56.90	83.91150
37	Rb	85.47	Rubidium	85	72.15	84.91171
38	Sr	87.62	Strontium	88	82.56	87.90561
39	Y	88.905	Yttrium	89	100	88.90543
40	Zr	91.22	Zirconium	90	51.46	89.90432
41	Nb	92.906	Niobium	93	100	92.90602
42	Mo	95.94	Molybdenum	98	23.75	97.90551
43	Tc	*	Technetium	98		97.90730
44	Ru	101.07	Ruthenium	102	31.3	101.90372
45	Rh	102.905	Rhodium	103	100	102.90480
46	Pd	106.4	Palladium	106	27.2	105.90320
47	Ag	107.870	Silver	107	51.35	106.90497
48	Cd	112.40	Cadmium	114	28.8	113.90357
49	In	114.82	Indium	115	95.7	114.90407
50	Sn	118.69	Tin	120	32.97	119.90213
51	Sb	121.75	Antimony	121	57.25	120.90375
52	Te	127.60	Tellurium	130	34.49	129.90670
53	I	126.9044	Iodine	127	100	126.90435
54	Xe	131.30	Xenon	132	26.89	131.90416
55	Cs	132.905	Cesium	133	100	132.90509
56	Ba	137.34	Barium	138	71.66	137.90501
57	La	138.91	Lanthanum	139	99.911	138.90606
58	Ce	140.12	Cerium	140	88.48	139.90528
59	Pr	140.907	Praseodymium	141	100	140.90739
60	Nd	144.24	Neodymium	144	23.85	143.90998
61	Pm	*	Promethium	145		144.91231
62	Sm	150.35	Samarium	152	26.63	151.91949
63	Eu	151.96	Europium	153	52.23	152.92086
64	Gd	157.25	Gadolinium	158	24.87	157.92410
65	Tb	158.924	Terbium	159	100	158.92495
66	Dy	162.50	Dysprosium	164	28.18	163.92883
67	Ho	164.930	Holmium	165	100	164.93030
68	Er	167.26	Erbium	166	33.41	165.93040
69	Tm	168.934	Thulium	169	100	168.93435
70	Yb	173.04	Ytterbium	174	31.84	173.93902
71	Lu	174.97	Lutetium	175	97.40	174.94089
72	Hf	178.49	Hafnium	180	35.44	179.94681
73	Ta	180.948	Tantalum	181	100	180.94798
74	W	183.85	Tungsten	184	30.6	183.95099
75	Re	186.2	Rhenium	187	62.93	186.95596
76	Os	190.2	Osmium	192	41.0	191.96141
77	Ir	192.2	Iridium	193	61.5	192.96328
78	Pt	195.09	Platinum	195	33.7	194.96482
79	Au	196.967	Gold	197	100	196.96655
80	Hg	200.59	Mercury	202	29.80	201.97063
81	Tl	204.37	Thallium	205	70.50	204.97446
82	Pb	207.19	Lead	208	52.3	207.97664
83	Bi	208.980	Bismuth	209	100	208.98042
84	Po	[210]	Polonium	210		209.98287
85	At	*	Astatine	211		210.98750
86	Rn	*	Radon	211		210.99060
87	Fr	*	Francium	221		221.01418

العدد الذرى z ATOMIC NUMBER Z	الرمز SYMBOL	متوسط الكتلة الذرية AVERAGE ATOMIC MASS	العنصر ELEMENT	عدد الكتلة A MASS NUMBER A	التوفر النسبى ، ٪ RELATIVE ABUNDANCE, %	كتلة النظير MASS OF ISOTOPE
88	Ra	[226]	Radium	226		226.02536
89	Ac	*	Actinium	225		225.02314
90	Th	[232.038]	Thorium	232	100	232.03821
91	Pa	[231]	Protactinium	231		231.03594
92	U	[238.03]	Uranium	233		233.03950
				235	0.715	235.04393
				238	99.28	238.05076
93	Np	*	Neptunium	239		239.05294
94	Pu	*	Plutonium	239		239.05216
95	Am	*	Americium	243		243.06138
96	Cm	*	Curium	245		245.06534
97	Bk	*	Berkelium	248		248.070305
98	Cf	*	Californium	249		249.07470
99	Es	*	Einsteinium	254		254.08811
100	Fm	*	Fermium	252		252.08265
101	Md	*	Mendelevium	255		255.09057
102	No	*	Nobelium	254		254
103	Lw	*	Lawrencium	257		257

* لم تدرج الكتل الذرية للعناصر غير المستقرة مالم يكن النظير المعطى هو النظير الأساسى .

ملحق « ٥ »

الدوال المثلثية

ANGLE deg	SINE	CO-SINE	TAN-GENT
0°	0.000	1.000	0.000
1°	.018	1.000	.018
2°	.035	0.999	.035
3°	.052	.999	.052
4°	.070	.998	.070
5°	.087	.996	.088
6°	.105	.995	.105
7°	.122	.993	.123
8°	.139	.990	.141
9°	.156	.988	.158
10°	.174	.985	.176
11°	.191	.982	.194
12°	.208	.978	.213
13°	.225	.974	.231
14°	.242	.970	.249
15°	.259	.966	.268
16°	.276	.961	.287
17°	.292	.956	.306
18°	.309	.951	.325
19°	.326	.946	.344
20°	.342	.940	.364
21°	.358	.934	.384
22°	.375	.927	.404
23°	.391	.921	.425
24°	.407	.914	.445
25°	.423	.906	.466
26°	.438	.899	.488
27°	.454	.891	.510
28°	.470	.883	.532
29°	.485	.875	.554
30°	.500	.866	.577
31°	.515	.857	.601
32°	.530	.848	.625
33°	.545	.839	.649
34°	.559	.829	.675
35°	.574	.819	.700
36°	.588	.809	.727
37°	.602	.799	.754
38°	.616	.788	.781
39°	.629	.777	.810
40°	.643	.766	.839
41°	.658	.755	.869
42°	.669	.743	.900
43°	.682	.731	.933
44°	.695	.719	.966
45°	.707	.707	1.000
46°	.719	.695	1.036
47°	.731	.682	1.072
48°	.743	.669	1.111
49°	.755	.656	1.150
50°	.766	.643	1.192
51°	.777	.629	1.235
52°	.788	.616	1.280
53°	.799	.602	1.327
54°	.809	.588	1.376
55°	.819	.574	1.428
56°	.829	.559	1.483
57°	.839	.545	1.540
58°	.848	.530	1.600
59°	.857	.515	1.664
60°	.866	.500	1.732
61°	.875	.485	1.804
62°	.883	.470	1.881
63°	.891	.454	1.963
64°	.899	.438	2.050
65°	.906	.423	2.145
66°	.914	.407	2.246
67°	.921	.391	2.356
68°	.927	.375	2.475
69°	.934	.358	2.605
70°	.940	.342	2.757
71°	.946	.326	2.904
72°	.951	.309	3.078
73°	.956	.292	3.271
74°	.961	.276	3.487
75°	.966	.259	3.732
76°	.970	.242	4.011
77°	.974	.225	4.331
78°	.978	.208	4.705
79°	.982	.191	5.145
80°	.985	.174	5.671
81°	.988	.156	6.314
82°	.990	.139	7.115
83°	.993	.122	8.144
84°	.995	.105	9.514
85°	.996	.087	11.43
86°	.998	.070	14.30
87°	.999	.052	19.08
88°	.999	.035	28.64
89°	1.000	.018	57.29
90°	1.000	.000	∞

الزاوية ، درجة : Angle, deg

جيب الزاوية،جا : Sine

جيب تماما الزاوية،جتا : Cosine

ظل الزاوية،ظا : Tangent

ملحق « ٦ »

الأجوبة

الفصل الأول

1. 10 blocks; 53° north of east
3. 71 km west; 71 km south
5. 14.2 cm at 257°
7. 953 mi north; 550 mi west
9. 3.38 N at 331°
11. 13.1 lb; 10.5 lb
13. 5.0 lb at 90°
15. 5.8 cm/s at 31° east of south
17. 50 lb; 100 lb
19. 432 lb
21. W_2; 3
23. 28 N; 80 N
25. 88 N; 38 N, 94 N, 32 N

الفصل الثانى

1. 91.4 mi/h = 147 km/h
3. 0.49 cm/yr; 49 cm/century upward
5. 1 cm/s; 0.86 cm/s; −0.40 cm/s; −1.0 cm/s; zero
7. 80 m
9. 1.4 m/s^2; 280 m
11. 3.2×10^5 m/s^2; 4.7×10^{-4} s
13. $L/200\ s^{-2}$; 156 s
15. 100 ft; 2.5 s
17. 198 m/s
19. 2.76 s; 20 m/s
21. 8.89 s; 133 m
23. 2.67 m/s^2
25. 0.495 s; 4.85 m/s

الفصل الثالث

1. 140 N
3. 50 lb
5. 1000 N = 225 lb
   3.6×10^4 lb
9. 210 lb; 110 lb
11. 0.98 ft
13. 6.8 ft/s^2
15. 3.82 m/s^2; 9.6 N; 0.90 m/s^2; 14.2 N
17. 47 N; 1.43 s
19. 4.9 m/s^2; 14.7 N
21. 1.73 m/s^2; no
23. $F/2m$; $(F - 2f)/2m$
25. 1.84 m/s^2; 3.68 m/s^2; 0.735 N; 2.39 N

الفصل الرابع

1. 1.86×10^{-40} N; $F_G/W = 1.14 \times 10^{-14}$
3. 1.34
5. 501 lb
7. 79 m
9. 411 lb
11. 2920 N
13. 78 m
15. 33 m; 6.2 W
17. (*a*) 64 m; (*b*) 3.70 s
21. 2.71 m/s^2; 50 N
23. 0.977 m/s^2; 17.6 N; 105 N

الفصل الخامس

1. 88 J
3. 2×10^4 ft · lb
5. (*a*) 3.23×10^8 J; (*b*) 181 hp
7. 2250 lb
9. (*a*) 8.2×10^4 ft · lb; (*b*) $\frac{1}{41}$
11. 0.163 W

15. (*a*) Yes; (*b*) 20.4 m
17. 4.43, 2.42, and 3.13 m/s
21. 7.2 m/s
23. 6.8 m/s
25. (*a*) 20; (*b*) 15; (*c*) 0.75
27. (*a*) 8.33; (*b*) 10; (*c*) 83%
29. 0.59 hp
31. (*a*) 265 N; (*b*) 0.027 N

الفصل السادس

1. $m\sqrt{2gh}$
3. (*a*) 1600 lb; (*b*) 200 ft
5. 7200 N
7. (*a*) 0.143 m/s; (*b*) 0.048 N
9. 673 m/s
11. 0.30 m/s
13. Zero
15. h; h
17. $-\frac{1}{2}v_0$; $\frac{1}{2}v_0$
19. (*b*) Two masses fly off
21. Four times atmospheric

الفصل السابع

1. (*a*) 25°, 0.069 rev, 0.436 rad; (*b*) 464°, 1.29 rev, 8.1 rad; (*c*) 263°, 0.73 rev, 4.59 rad
3. (*a*) 0.80 rev/s^2; (*b*) 160 rev
5. 1.13 rev/s
7. (*a*) 463 m/s; (*b*) zero
9. 565 in.
11. 90 rev
13. 9000 lb
15. 0.57
17. 2.42 m/s
19. 9.5×10^{-8} N
21. 4.74 N
25. 0.55°

الفصل الثامن

1. (*a*) L, $0.77L$, $0.33L$, $0.29L$; (*b*) $-FL$, $0.77FL$, $0.33FL$, $0.29FL$
3. 70 lb
5. (*a*) 1170 N; (*b*) 752 N, 100 N
7. (*a*) $2.77F$; (*b*) $-0.45F$, $3.47F$
9. 1450 N; 1000 N; 500 N; 2410 N
11. (*a*) 4.25 kg · m^2; (*b*) 7.06 kg · m^2; (*c*) 0.92 m, 1.19 m
13. 1×10^{-3} kg · m^2
15. 0.80 N · m
17. (*a*) 0.125 lb · ft; (*b*) 20 rad
19. (*a*) 7200 slug · ft^2; (*b*) 15.99 lb
21. (*a*) 3.03 m/s; (*b*) 9.65 rev/s
25. 0.388 rev/s

الفصل التاسع

1. 7.92 g/cm^3
3. 0.070 m^3
5. 9.1×10^{-4} m
7. 1.39×10^{-4}
11. (*a*) 6.1×10^{-7}; (*b*) 10^7 N/m^2
13. 6.08×10^3 N = 1370 lb
15. (*a*) 10.34 m; (*b*) 10.34 m
17. 0.87 g/cm^3
19. 0.95 g/cm^3
21. 0.75 g/cm^3
23. 21.6 g
25. 0.895
29. (*a*) 4.87×10^{-6} N; (*b*) 1.334×10^{-5} N; (*c*) 4.28×10^{-3} m/s
31. (*a*) 56.7 ft/s; (*b*) 3.9×10^{-3} ft^3 = 6.8 in^3
33. 3.81 N

الفصل العاشر

1. (*a*) 25°C, 298 K; (*b*) −35°C, 238 K
3. −38°F; 675°F
5. (*a*) 131°C; (*b*) 10.5 atm
7. 177°C
9. 0.449 cm^3
11. (*a*) 1.30×10^{-25} kg; (*b*) 6.8×10^{21}
13. (*a*) 5.5×10^{-11} kg · mol; (*b*) 3.3×10^{10}
15. 1.36×10^6 N/m^2 = 13.4 atm
17. 22.4×10^{-3} m^3
19. (*a*) 4.1×10^{-22} atm; (*b*) 6.2×10^{-23} J; (*c*) 273 m/s
21. (*a*) 8.15×10^4 N/m^2, 1.92×10^4 N/m^2, 0.066×10^4 N/m^2; (*b*) 1.01×10^5 N/m^2
23. 42,300 kg/kg · mol

الفصل الحادى عشر

1. (*a*) 24.8 cal; (*b*) 0.0984 Btu
3. (*a*) 48.4 Btu; (*b*) 12,200 cal
5. 65°C
7. 78 g
9. 8.0 g
11. 46.9 g
13. 8400, 8400, 8400, 8300, 8500, 8400, and 8400 J/(kg · mol)(K)
15. 24.3°C
17. 7.86 g
19. 0.55 cal/g
21. 0°C
25. 0.075%
27. 395°C
29. 1.23 cm^3
31. 5820 lb/in^2
33. 15.1 cal
35. 2.01×10^5 cal
39. (*a*) 13.50 g/m^3; (*b*) 79%
41. 21%

الفصل الثانى عشر

1. (*a*) 5020 J; (*b*) larger
3. (*a*) 45 J; (*b*) zero
5. (*a*) 606°C, 1192°C, 215°C; (*b*) yes, no, no, yes
7. 6960 J
9. (*a*) 1.00×10^6 N/m^2; (*b*) 460°C
11. (*a*) 9.2 hp; (*b*) 5.2 g
13. 0.58
15. (*a*) no; (*b*) 2; (*c*) 4; (*d*) 7
17. (*a*) 9.8×10^{-4}; (*b*) 9.8×10^{-3}
19. (*a*) Zero; (*b*) $1.38 \times 10^{-23} \ln 5$ or 2.22×10^{-23} J/K

الفصل الثالث عشر

1. (*a*) 0.333 Hz; (*b*) 3.0 s; (*c*) 7.0 cm
3. (*a*) 1.93×10^{-4} m; (*b*) 36 Hz
5. 2.19×10^{-3} J
7. (*a*) 0.090 m/s^2; (*b*) 0.052 m/s
9. (*a*) 3.0 Hz; (*b*) 15 cm; (*c*) 2.83 m/s; (*d*) zero
11. (*a*) 53 m/s^2; (*b*) zero; (*c*) $53 \cos\theta$ m/s^2
13. (*a*) 9.8 m/s^2; (*b*) 1.76 Hz
15. (*a*) 1.28 Hz; (*b*) 2.54 ft/s
17. (*a*) 1.80 Hz; (*b*) 1.89 ft/s
19. 0.389 m
23. 0.0316 m

الفصل الرابع عشر

1. 1.80 s
3. (*a*) 30 m; (*b*) 600 m/s
5. 8.0×10^{-3} N
7. (*a*) 0.53 m; (*b*) 267 m/s
9. (*a*) Lowest frequency; (*b*) 4
11. 20, 40, 80, and 100 Hz
13. 5000 Hz
15. 1250, 3750, and 6250 Hz
17. 0.32, 0.64, and 0.95 Hz

الفصل الخامس عشر

1. 2040 m
3. 4.4×10^{-10} m²/N
5. 2.9%
7. 73 dB
9. (*a*) 10^{-6} W/m²; (*b*) 1.33
11. (*a*) ±34, ±68, and ±102 cm; (*b*) ±17, ±51, and ±85 cm
13. 113, 340, and 567 Hz
15. 1700 Hz
17. 0.065 and $n \times 0.065$ Hz
19. 31 m/s
21. (*a*) 2202 and 2198 Hz
23. 2988 Hz

الفصل السادس عشر

1. 1200 N
3. (*a*) 8.2×10^{-8} N; (*b*) 2.2×10^{6} m/s
5. 4.79 N at −45°
7. (*a*) -9×10^{5} N/C; (*b*) 3.11×10^{5} N/C
9. 6.4×10^{6} N/C down
11. (*a*) 9.6×10^{-18} J; (*b*) -9.6×10^{-18} J
13. (*a*) 2.0 cm; (*b*) 4.8×10^{-17} N
15. (*a*) 2.4×10^{5} V; (*b*) zero
17. (*a*) 2 A, 5 A, 27 V; (*b*) 50 μC -1.80×10^{6} V
19. (*a*) 1.225×10^{5} V/m; (*b*) 3.2×10^{-19} C
21. (*a*) 25 cm from 3 μC; (*b*) unstable

الفصل السابع عشر

1. (*a*) 2.05×10^{6} m/s; (*b*) 12 eV
3. (*a*) 1500 eV; (*b*) 3500 eV; (*c*) 3000 and 2000 eV
5. (*a*) 2400 C; (*b*) 1.5×10^{22}
7. 240 Ω
9. (*a*) 0.0161 Ω; (*b*) 0.48 V
11. 24 Ω
13. 130 Ω
15. 1.8×10^{-7} C
17. 4.73×10^{-8} F
19. (*a*) 36 nC; (*b*) 13.3 V; (*c*) 24×10^{-9} J (*d*) 24×10^{-9} J

الفصل الثامن عشر

1. (*a*) 6 Ω; (*b*) 2.0 A
3. (*a*) 12 Ω; (*b*) 8 Ω
5. 1.33 μF
7. 3.33, 0.50, and −3.83 A
9. 0, 0 A; 42 μC
11. (*a*) 2.15 Ω; (*b*) 29 V
13. (*a*) 1.14 A; (*b*) 6.3 V
15. 15.3 A
17. (*a*) 2 A, 5 A, 27 V; (*b*) 50 μC
19. 2, 14, 3, and 9 A
21. (*a*) 12 V; (*b*) 24 μC; 48 μC
23. $\frac{5}{3}$ Ω

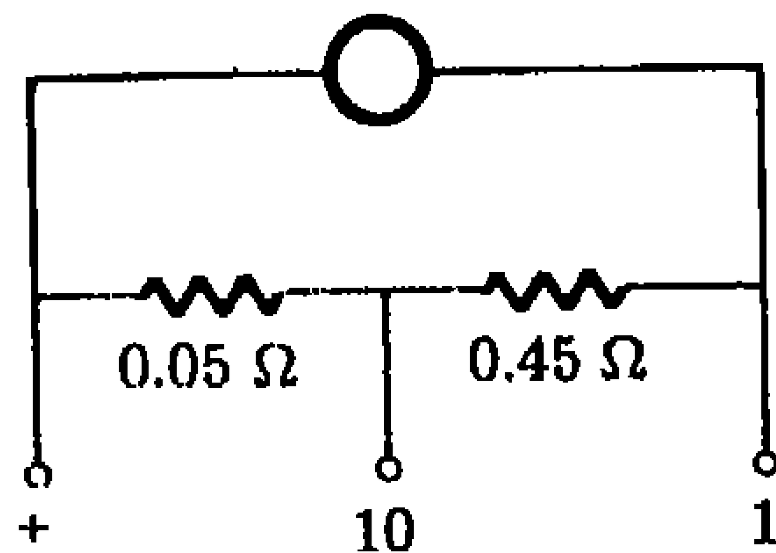
الفصل التاسع عشر

1. (*a*) 0.024 N; (*b*) into earth
3. (*a*) 0.0083 N; (*b*) west
5. (*a*) 1.2×10^{-6} T; (*b*) north
7. 1250 A
9. (*a*) 0.0314 T; (*b*) 1.57 T; (*c*) 2.2×10^{-5} Wb
11. (*a*) 1×10^{-5} T; (*b*) 2×10^{-4} N, repulsion; (*c*) 2×10^{-4} N
13. 11.2×10^{-4} T
15. Along the line $y = -2x$
17. 0.167 m
19. Circle perpendicular to B; $r = 1.14$ m
21. Helix with $r = 0.52$ cm and pitch = 5.7 cm
23. (*a*) 6.3×10^{14}; (*b*) 1×10^{-9} T; (*c*) clockwise
25. 3.5×10^{6} m/s

7. 0.188 $A \cdot m^2$
9. (*a*) 1.91×10^{-4} N · m; (*b*) north
11. 5.0 V
13. 1.50 T
15. (*a*) 2.0 V; (*b*) 0.10 H
17. (*a*) 0.0036 V
19. (*a*) 110 V; (*b*) 24 A

الفصل العشرون

1. 0.050 Ω shunt
3. 1950 Ω in series
5.



الفصل الحادى والعشرون

1. (*a*) 8.0 s; (*b*) 8.0 s; (*c*) 1.6×10^{-5} C; (*d*) 2.0×10^{-6} A
3. 2.83 A
5. 250 W
7. 0.45 A
9. (*a*) 377 V; (*b*) 3.77×10^{6} V
11. (*a*) 0.036 A; (*b*) 3.6 A; (*c*) zero
13. 2.36 A
15. (*a*) 70 μF; (*b*) 7.0 H
17. (*a*) 0.66 H or 0.74 H; (*b*) 47 mH
19. (*a*) 0.10 A; (*b*) 0.10 W; (*c*) 0.10
21. (*a*) 180 W; (*b*) 0.092 H
23. 41.7 on 120 V; no
25. 100

الفصل الثانى والعشرون

1. (*a*) 5.2×10^{-20} J; 0.32 eV
3. (*a*) 3.5×10^{8} N/m^2; (*b*) 3500 times larger
5. 0.20 or 20%
7. (*a*) 0.80 Hz; (*b*) 3.75×10^{8} m
9. 14.7 s
11. Of the order of 1×10^{-6} V
13. (*a*) 8.3×10^{-8} m; (*b*) long x-rays

الفصل الثالث والعشرون

1. Right
3. 2.03×10^{8} m/s
5. 3.9×10^{8} m
7. (*a*) 24°; (*b*) 0°
9. 37°; 29.3°
11. (*a*) 1.414 at least
13. (*a*) −8.33 cm; (*b*) 0.50 cm; (*c*) virtual, erect; (*d*) −6.67 cm, 1.00 cm virtual, erect; (*e*) −3.33 cm, 2.0 cm, virtual, erect
15. (*a*) 200 cm; (*b*) no; (*c*) same
17. (*a*) 30 cm; (*b*) 10 cm
19. (*a*) 25 cm, 0.75 cm, real, inverted; (*b*) 40 cm, 3.0 cm, real, inverted; (*c*) −20 cm, 6.0 cm, virtual, erect
21. (*a*) $p = 2f$; (*b*) real
23. (*a*) 75 cm past second lens; (*b*) 0.50
25. (*a*) 11.2 cm past first lens; (*b*) 0.75
27. Left of lens: 4, 4, and 8 cm

الفصل الرابع والعشرون

1. (*a*) 2.0 cm; (*b*) 1.85 cm
3. (*a*) Farsighted; (*b*) converging, 43 cm
5. Infinity; 150 cm
7. 16.7 cm
9. 8.0 m
11. (*a*) 5.83 diopters; (*b*) 17.1 cm
13. 8.3
15. (*a*) About 17 cm; (*b*) about 3.5
17. 200 km
19. (*a*) 45°; (*b*) 38°

الفصل الخامس والعشرون

1. (*a*) Zero; (*b*) 50 cm; (*c*) 150 cm; (*d*) 125 cm
3. ±0.025, ±0.050, and ±0.075 cm
5. 0.020 cm
7. 250, 500, 750, and 1000 nm
9. 1.6×10^{-6} m
11. 5.52×10^{-4} m
13. (*a*) Zero or 152 nm
15. 36.1°
17. 19.4°
19. (*a*) No; (*c*) yes; (*d*) ratio of orders mus be 3:2
21. 5.0 cm
23. 0.226 cm

الفصل السادس والعشرون

1. 5.6×10^{-20} J = 0.35 eV
3. (*a*) Infrared; (*b*) 4130 Å
5. (*a*) 2590 Å; (*b*) ultraviolet
7. (*a*) 3.2×10^{-5} m; (*b*) infrared
9. 2.8 eV
11. 91.2 nm
13. Will live 10,013 s; yes
15. (*a*) 5.2×10^{-27} kg; (*b*) 0.948c
17. 2.8×10^{-12} kg
19. c
21. 7.3×10^{6} m/s
23. (*a*) 1.46×10^{6} m/s; (*b*) 1.005 nm; 1.46×10^{6} m/s

الفصل السابع والعشرون

1. (*a*) $(3.6 \times 10^{-26})/r$ J; (*b*) 4.7×10^{-14} m
3. (*a*) 9.50×10^{-8} m; (*b*) 3.97×10^{-8} m
5. 0.052
7. (*a*) 1.59×10^{6} m/s; (*b*) 2.53×10^{15} Hz; (*c*) 1.18×10^{-7} m
9. 10
11. 0.062 nm
13. (*a*) 72 cal/s; (*b*) 215°C
15. 1879, 656, 486, 122, 103, and 97 nm
17. (*a*) 3000 eV
19. $600 \pm 1.200 \times 10^{-12}$ nm

الفصل الثامن والعشرون

1. (*a*) 1.2×10^{-15} m; (*b*) 2.3×10^{14} g/cm^3
3. 11.55 cm
5. 65.03 u
7. $^{208}_{92}$Pb
9. (*a*) 6.3×10^{6} s^{-1}; (*b*) 170 μCi
11. 8.9×10^{-4} g
13. 92 MeV
15. 2.15×10^{-3} u
17. 60 mrems
19. (*a*) 5.7×10^{14} J; (*b*) 1.82×10^{11}°C

قائمة المصطلحات العلمية Glossary

الفصل الأول

Tension	شد
Diagram	رسم بيانى (رسم تخطيطى)
Diagram, schematic	رسم بيانى تخطيطى
Force vector	متجه القوة
Free-body diagram	رسم بيان الجسم الحر
Force diagram	رسم بيان القوى
Velocity	سـرعـة
Speed	معدل الحركة (سرعة لااتجاهية)
Component	مركبة
Component, rectangular	مركبة متعامدة
Slash mark	علامة الشق الطولى
Graphical method	الطريقة البيانية
Trigonometric method	الطريقة المثلثية
Trigonometric function	دالة مثلثية
Trigonometric tables	جداول النسب المثلثية
Trigonometry	علم حساب المثلثات
Physical universe	الكون الفيزيائى
Vector	متجه
Vector quantity	كمية موجهة
Vector force	قوة موجهة
Vector diagram	رسم بيان المتجهات
Vector displacement	إزاحة موجهة
Force	قـوة
Pythagorian theory	نظرية فيثاغورث
Balanced force	قوة متزنة
Unbalanced force	قوة غير متزنة
Displacement	إزاحة
Magnitude	مقدار
Direction	اتجاه

Scalar quantity	كمية غير موجهة (لاموجهة)
Resultant	محصلة
Resultant displacement	إزاحة محصلة
Simultaneous equations	معادلات آنية
Lathe bench	مخرطة نضدية
Positioning device	جهاز تحديد الموضع
Frictionless	لااحتكاكي
Motion	حـركــة
Sine	جيب
Cosine	جيب تمام
Opposite side	الضلع المقابل
Adjacent side	الضلع المجاور
Hypotenus	الـوتـر
Interpolation	الاستكمال من الداخل
Pound	باوند
Equilibrium	توازن (اتزان)
Balance	اتزان (توازن)
Gravitational attraction	تجاذب تثاقلي
Weight	وزن
Pull of gravity	شد الجاذبية الأرضية
Cart	عربة صغيرة
Friction	احتكاك
Net force	صافي القوة
Newton	نيوتن

الفصل الثانى

Acceleration	تسارع (عجلة)
Uniformly accelerated motion	حركة منتظمة التسارع
Free fall	سقوط طليق
average speed	متوسط معدل الحركة
Average velocity	متوسط السرعة
Average velocity vector	متوسط متجه السرعة
Velocity vector	متجه السرعة
Displacement vector	متجه الإزاحة
Independent variable	متغير مستقل

Coordinates	إحداثيات
Coordinate axes	محاور الإحداثيات
Instantaneous speed	معدل الحركة اللحظى
Instantaneous velocity	سرعة لحظية
Limiting value	القيمة الحدية (أو النهائية)
Unit	وحدة
Dimension	بعد
Rod (unit)	قصبة (وحدة طول)
Conversion factor	معامل تحويل
Multiplying factor	معامل الضرب
Acre	فدان (انجليزى)
Hectar	هكتار
Uniform acceleration	تسارع منتظم
Quadratic equation	معادلة من الدرجة الثانية
Quadratic formula	صيغة تجذير معادلات الدرجة الثانية
Formula	صيغة
Vacuum	فراغ
Incline	مستوى مائل
Experimentation	تجريب (اختبار علمى)
Technique	أسلوب تقنى
Law of conservation of energy	قانون بقاء الطاقة
Free-fall acceleration	تسارع السقوط الذاتى (أو تسارع الجاذبية)
Ice age	العصر الجليدى
Continental drift	زحزحة القارات
Fluorescent material	مادة فلورية
Fluorescent	فلورى
Screen	ستار
Check point	نقطة المراجعة
Push	دفـــع
Speedboat	زورق بخارى سريه
Parachute	باراشوت

الفصل الثالث

Newton's first law of motion	قانون نيوتن الأول للحركة
Newton's second law of motion	قانون نيوتن الثانى للحركة

Newton's third law of motion	قانون نيوتن الثالث للحركة
Mathematics	علم الرياضيات
Calculus	حساب التفاضل والتكامل
Law of gravitation	قانون الجاذبية
Force of friction	قوة الاحتكاك
Action	فعل
Reaction	رد فعل
Action force	قوة الفعل
Reaction force	قوة رد الفعل
Mass	كتلة
Inertia	القصور الذاتى
Massiveness	امتلاء
Pulley	بكرة
Measure	مقياس
Intrinsic property	خاصية ذاتية
Proportion	تناسب
Proportionality constant	ثابت تناسب
Air track	مسار هوائى
Characteristic constant	ثابت مميز
Astronaut	رائد فضاء
Sattellite, earth's	تابع أرضى (أو قمر صناعى)
Weightlessness	انعدام الوزن
Weightless	عديم الوزن
Circular motion	حركة دائرية
Orbit	مدار
Unit, standard	وحدة قياسية
Unit of length	وحدة طول
Unit of time	وحدة زمن
Unit of mass	وحدة كتلة
Meter	متر
Meter, standard	المتر الإمام (العيارى)
Temperature	درجة الحرارة
Wavelength	الطول الموجى
Time, standard	زمن إمامى (قياسى)
Mass, standard	كتلة إمامية (قياسية)
Mks system	النظام mks
Metric system	النظام المترى

SI system	النظام SI
Prototype	طراز بدئى
National Bureau of Standards	المكتب القومى للمقاييس العيارية
Secondary standard	مقياس إمامى ثانوى
Prefix	بادئــة
Factor	معامل
Dyne	داين
Slug	سلج
Atwood's machine	آلة آتوود
Friction force	قوة احتكاك
Pushing force	القوة الدافعة
Maximum	نهاية عظمى
Coefficient of friction	معامل الاحتكاك
Coefficient of friction, dynamic	معامل الاحتكاك الديناميكى
Coefficient of friction, kinetic	معامل الاحتكاك الحركى
Coefficient of friction, static	معامل الاحتكاك الاستاتيكى
Normal force	قوة عمودية
Skidding	تزحلق
Sliding	انزلاق
Terminal velocity	سرعة نهائية

الفصل الرابع

Attraction	جذب ، تجاذب
Attraction force	قوة تجاذب
Attractive force	قوة جاذبة
Gravitational force	قوة الجذب
Gravitational attractive force	قوة جاذبة تثاقلية
Gravitational attraction	تجاذب تثاقلى
Gravitational field	مجال الجاذبية
Gravitational field strength	شدة مجال الجاذبية
Gravitation	جاذبية
Newton's law of gravitation	قانون نيوتن للجاذبية
Astronomer	عالم فلك
Solar system	النظام الشمسى
Planet	كوكب

Earth	الأرض
Moon	القمر
Planetary motion	حركة كوكبية
Gravitational constant	ثابت الجاذبية
Cavendish balance	ميزان كافنديش
Optical lever	ذراع بصرى
Beam of light	شعاع ضوئى
Inclined axes	محاور مائلة
Trajectory	مسار المقذوف
Projectile	مقذوف
X-Rays	أشعة سينية (أشعة اكس)
High voltage	فلطية عالية
Discharge	تفريغ
Discharge tube	أنبوب تفريغ
Electrode	قطب كهربائى (الكترود)
Spark	شرارة
Glow	وهج
Potential difference	فرق جهد
Neon signs	إشارات النيون
Radiation	إشعاع
Heavy metals	فلزات ثقيلة
Over-exposure	تعرض مفرط
Time of flight	زمن الطيران
Asteroid	كويكب سيار
Planetoid	كويكب سيار
Hitch	وصلة جر
Trailer	مقطورة
Electron gun	مدفعة الكترونات
Energy	طاقة
Conservation	بقاء ، حفظ
Mechanics	علم الميكانيكا
Work	شغل
Supporting force	قوة حاملة
Foot	قدم
Foot-pound	قدم – باوند
Joule	جول
Erg	إرج

Newton-meter	نيوتن – متر
Dyne-centimeter	داين – سنتيمتر
Dot product	حاصل ضرب نقطى
Scalar product	حاصل ضرب عددى
Rate	معدل
Power	قدرة
Watt	واط
Kilowatt	كيلوواط
Horsepower	القدرة الحصانية
Electricity	كهرباء ، كهربائية
Kilowatt hour	كيلوواط ساعة
Power output	قدرة الخرج
Power, output	خرج القدرة
Machine	مكنة (آلة)
Time of operation	زمن التشغيل
Motor	موتور ، محرك
Kinetic energy	طاقة حركة
Friction work	شغل احتكاك
Interrelation	علاقة متبادلة
Potential energy	طاقة وضع
Gravitational potential energy	طاقة وضع تثاقلية
Loss	فقد ، فاقد
Gain	كسب ، زيادة
Conservative force	قوة احتفاظية
Electrostatic force	قوة استاتية كهربائية
Nuclear force	قوة نووية
Work-energy theorem	نظرية الشغل والطاقة
Work-energy equation	معادلة الشغل والطاقة
Pendulum	بندول
Battery	بطارية
Starter	بادىء تشغيل
Electrical energy	طاقة كهربائية
Nuclear energy	طاقة نووية
Chemical energy	طاقة كيميائية
Heat energy	طاقة حرارية
Combustion chamber	غرفة احتراق
Combustion products	نتاج الاحتراق

Cylinder	أسطوانة
Piston	كباس
Bearing	محمل ، كرسى تحميل
Perpetual-motion	مكنة الحركة الدائمة
Mechanism	آلية
Oil	زيت ، نفط ، بترول
Steam	بخار الماء (المغلى)
Fuel	وقود
Useful work	شغل نافع
Element	عنصر
Atom	ذرة
Nucleus	نواة
Nuclear reactor	مفاعل نووى
Geothermal	حرارى أرضى
Geothermal energy	طاقة حرارية أرضية
Solar heating	تسخين شمسى
Solar cell	خلية شمسية
Turbine	تربينة ، تربين
Ocean currents	تيارات محيطية
Fossil fuel	وقود احفورى
Device	نبيطة جهاز
Mechanical device	جهاز ميكانيكى – نبيطة آلية
Car jack	رافعة السيارة
Claw hammer	مطرقة مخلبية
Compound pulley	بكرة مركبة
Simple pulley	بكرة بسيطة
Pulley system	مجموعات بكرات ، جهاز بكرات
Gear system	مجموعة تروس
Wheel	عجلة
Axle	محور العجلة
Block-and-tackle	بكارة ، بكرة وحبل
Circumference	محيط الدائرة
Nose cone	مخروط المقدمة
Seat belt	حزام تثبيت
Sliding friction	احتكاك انزلاقى
Locomotive	قاطرة
Wattage	واطية

Atom-smashing machine	مكنة تحطيم ذرية
Van de Graaf generator	مولد فان دجراف
Proton	بروتون
Hydrogen	ايدروجين
Reducing gear	ترس تخفيض السرعة

الفصل السادس

Momentum	كمية التحرك
Pressure	ضغط
Ideal gas	غاز مثالى
Law of conservation of momentum	قانون بقاء كمية التحرك
Thrust	دفع
Rocket	صاروخ
Collision	تصادم . اصطدام
Impulse	دفع . دفعة
Rest mass	كتلة السكون
Particle	جسيم
System	نظام . مجموعة
Isolated system	نظام معزول
Linear momentum	كمية التحرك الخطى
Elastic collision	تصادم مرن
Inelastic collision	تصادم غير مرن
Hard	صلد
Resiliency	رجوعية
Perfectly elastic	تام المرونة
Perfectly inelastic	تام اللامرونة.— غير مرن تماما
Rocoil velocity	سرعة الارتداد
Relativity	النسبية
Special theory of relativity	النظرية النسبية الخاصة
Absolute velocity	سرعة مطلقة
Clock	ساعة كبيرة
Gear	ترس ، مسننة
Rotation	دوران
Revolution	دورة
Characteristics	خصائص ، مميزات
Input shaft	عمود الدخل

Input end	طرف الدخل
Input force	قوة الدخل
Input work	شغل الدخل
Input rope	حبل الدخل
Output shaft	عمود الخرج
Output end	طرف الخرج
Output force	قوة الخرج
Output wrok	شغل الخرج
Output rope	حبل الخرج
Black-box machine	مكنة الصندوق الأسود
Driving agent	العامل الحافز (المحرك)
Driving force	القوة الحافزة (أو الدامغة)
Point of application	نقطة العمل أو التسليط (لقوة موجهة)
Efficiency	كفاية
Mechanical advantage	الفائدة الميكانيكية
Ideal mechanical advantage	الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA)
Actual (or true) mechanical advantage	الفائدة الميكانيكية الفعلية (أو الحقيقية) (IMA)
Weight-lifting advantage	فائدة رفع الشغل
Inner workings	اشغال داخلية
Time dilation	تمدد الزمن
Relativistic factor	المعامل النسبى
Relativistic effect	تأثير نسبى
Ballistic pendulum	بندول قذفى
Impact	تصادم . دفع
Jet propulsion	دفع نفثى
Rocket propulsion	دفع صاروخى
Jet airplane	طائرة نفاثة
Jet engine	محرك نفاث
Jet	منفث
Repeating gun	بندقية تكرارية
Interaction	فعل متبادل
Atmosphere	جو . محيط جوى
Container	وعـاء
Real gas	غاز حقيقى
Ideal gas law	قانون الغاز المثالى
Standard atmospheric pressure	الضغط الجوى العيارى
Standard temperature	درجة الحرارة العيارية

Translational motion	حركة انتقالية
Car bumper	مصادم السيارة
Cushiòniong device	جهاز تخميد الصدمة
Ballistocardiograph	رسم القلب القذفى
Wrench	مفتاح ربط

الفصل السابع

Angular motion	الحركة الزاوية
Centripital force	القوة الجاذبة المركزية
Circular path	مسار دائرى
Rotational motion	حركة دورانية
Weightlessness	انعدام الوزن
Angular distance	المسافة الزاوية
Angular velocity	السرعة الزاوية
Average angular velocity	متوسط السرعة الزاوية
Instantaneous angular velocity	السرعة الزاوية اللحظية
Angular speed	السرعة الزاوية
Degree	درجــة
Revolution	دورة
Radian	زاوية نصف قطرية (أو نقية)
Radian measure	المقياس النصف قطرى (أو النقى)
Arc	قوس
Arc length	طول القوس
Radius	نصف قطر
Turn	لفــة
Angular acceleration	التسارع الزاوى
Average angular acceleration	متوسط التسارع الزاوى
Instantaneous angular acceleration	التسارع الزاوى اللحظى
Rotational velocity	سرعة دورانية
Angular motion equations	معادلات الحركة الزاوية
Tangential quantity	كمية مماسية
Tangential distance	مسافة مماسية
Tangential speed	معدل الحركة المماسية (أو السرعة المماسية)
Tangential velocity	سرعة مماسية
Tangential acceleration	تسارع مماسى
Linear acceleration	تسارع خطى

Radial quantity	كمية نصف قطرية (أو إشعاعية)
Radial force	قوة نصف قطرية (أو إشعاعية)
Radial acceleration	تسارع نصف قطرى (أو إشعاعى)
Centripital acceleration	تسارع الجذب المركزى
Centrifugal force	القوة الطاردة المركزية
Centrifugal acceleration	تسارع الطرد المركزى
Bisector	منصف (زوايا أو ضلوع)
Dashboard	لوحة أجهزة القياس
Apparent weight	الوزن الظاهرى
Actual weight	الوزن الفعلى (أو الحقيقى)
Cyclone	اعصار – زوبعة
Dust remover	مزيل الغبار
Spin-dry cycle	دورة التجفيف دوامة – دورة تجفيف مغزلية
Steep dive	انقضاض حاد
Pullout	الاعتدال من الانقضاض
Phonograhp	حاكى (فونوغراف)
Turntable	قرص دوار
Space station	محطة فضائية
Space capsule	كبسولة فضائية
Gear wheel	عجلة مسننة
Ferris wheel	عجلة فريس
Bohr model	نموذج بوهر

الفصل الثامن

Rigid body	جسم جاسىء
Spinning	تدويم . دوران
Angular momentum	كمية التحرك الزاوى
Rotational kinetic energy	طاقة الحركة الدورانية
Center of gravity	مركز الثقل
Center of mass	مركز الكتلة
Point mass	كتلة نقطية
Pivot	محور ارتكاز . مرتكز
Extended body	جسم ممتد
Plumb line	خط رأسى . مطمار
Torque	عزم الدوران
Rotational equilibrium	توازن دورانى
Pivot point	نقطة الدوارن

Seesaw	أرجوحة . تأرجح
Lever	رافعة
Lever arm	ذراع الرافعة
Line of force	خط القوة
Moment	عزم
Translational momentum	كمية التحرك الانتقالى
Moment of force	عزم القوة
Moment arm	ذراع العزم
Plank	لوح خشبى ثخين
Compressional force	قوة تضاغطية
Stable equilibrium	توازن مستقر
Neutral equilibrium	توازن متعادل
Unstable equilibrium	توازن غير مستقر
Static equilibrium	توازن استاتى
Inertia	القصور الذاتى
Moment of inertia	عزم القصور الذاتى
Rotational inertia	عزم القصور الدورانى
Fan blade	ريشة المروحة
Flywheel	حدافة
Gyration	تدويم . دوران
Radius of gyration	نصف قطر الحركة التدويمية
Hoop	طوق . طارة
Kinetic energy of rotation	طاقة الحركة الدورانية
Conservation of angular momentum	بقاء كمية التحرك الزاوى
Stabilized gyroscope	جيروسكوب موازن
Summer solstice	الانقلاب الصيفى
Winter solstice	الانقلاب الشتوى
Vernal (Spring) equinox	الاعتدال الربيعى
Autumual equinox	الاعتدال الخريفى
Aphelion	نقطة الرأس (الأبعد من الشمس فى مدار كوكب سيار)
Perihelion	نقطة الحضيض (الأقرب من الشمس فى مدار كوكب سيار)
Ellepse	قطع ناقص
Spool	مكب . ملف خيط
Parallel-axis theorem	نظرية المحاور المتعامدة

الفصل التاسع

Mechanical properties of matter	الخواص الميكانيكية للمادة
Static property	خاصية استاتية
Dynamic property	خاصية دينامية
State	حالة
Fluid	مائع . سائل (أحيانا)
Aggregate	مجموعة
Solid	. جامد . مادة صلبة
Viscous	لزج
Molasses	دبس السكر (عسل أسود)
Plastic	لدن . بلاستيك
Crystal	بلورة
Crystalline solid	جامد بلورى (متبلور)
Glassy solid	جامد زجاجى
Crystal lattice	مشبك بلورى
Structure	بنية (البلورات)
Brittle	قصيف
Supercooled liquid	سائل مفرط التبريد
Amorphous	غير متبلور
Polyethelene	بوليثيلين
Specific gravity	الوزن النوعى . الثقل النوعى
Density	كثافة
Mass density	كثافة كتلية
Weight density	كثافة وزنية
Vibrate	يهتز
Relative density	الكثافة النسبية
Hooke's law	قانون هوك
Deformability	قابلية التشوه
Deformation	تشوه
Load	حمل
Elastic range	مدى المرونة
Elastic limit	حد المرونة
Yield point	نقطة الخضوع
Tensile force	قوة الشد
Stress	إجهاد
Strain	انفعال
Tensile strain	انفعال الشد

Cross-sectional area	مساحة المقطع
Elongation	استطالة
Modulus	معامل . معاير
Shear modulus	معامل القص (معامل الجسوءة)
Bulk modulus	معامل الحجم
Young's modulus	معامل يونج
Compliance	مطاوعة – استجابة
Shear compliance	مطاوعة القص
Tensile compliance	مطاوعة الشد
Hardness	صلادة
Rigidity	جسوءة . جساءة
Bending	انحناء
Compressibility	انضغاطية
Bulk comressibility	الانضغاطية الحجمية
Pascal's principle	قاعدة باسكال
Archimede's principle	قاعدة ارشميدس
Buoyant force	قوة الطفو
Buoyancy principle	قاعدة الطفو
Hydraulic press	مكبس ايدرولى
Calipers	عدة قياس بفكين
Volumetric flask	قاروره حجمية
Barometer	بارومتر (مقياس الضغط)
Barometric pressure	ضغط بارومترى
Boiling point	نقطة أو درجة الغليان
Vacuum pump	مضخة تفريغ
Manometer	مانومتر
Flow	انسياب . دفق . تدفق جريان
Laminar flow	انسياب طبقى . تدفق . صفحى
Simple flow	انسياب بسيط
Turbulant flow	تدفق مضطرب . دفق دوامى
Pipe	ماسورة . أنبوبة (أحيانا)
Stream line	خط انسيابى
Flow velocity	سرعة الانسياب . سرعة الدفق
Flow line	خط انسيابى
Flow rate	معدل الدفق
Poise	بويز (وحدة اللزوجة)
Poiseuille's law	قانون بوازيل

Velocity profile	جانبية السرعات
Profile	جانبية
Viscosity	لزوجة
Viscous force	قوة اللزوجة
Driving pressure	ضغط دافع
Centipoise	سنتيبويز (وحدة اللزوجة)
Viscometer	مقياس اللزوجة
Capillary	شعرى . أنبوبة شعرية
Capillary tube	أنبوبة شعرية
Capillary Viscometer	مقياس لزوجة شعرى
Bernoulli's equation	معادلة برنولى
Incompressible	غير قابل للانضغاط . لاينضغط
Viscous friction	احتكاك اللزوجة
Torricelli's theorem	نظرية توريشيللى
Spigot	ذيل الماسورة
Efflux	تدفق . انبجاس
Efflux speed	سرعة الانبجاس
Aspirator	سافط أو سفاط (لسحب الغاز)
Atomizer	مرذاذ . مذرة
Blood pressure	ضغط الدم
Squeeze bulb	بصيلة الكبس (الضغط)
Release valve	صمام التصريف
Stethoscope	سماعة الطبيب . مسماع
Systolic pressure	الضغط الانقباضى
Diastolic pressure	الضغط الانسيالى
Pressure peak	ذروة الضغط
Glass fiber	ألياف زجاجية
Fiber glass	الزجاج الليفى
Collagen fibers	ألياف الكولاجين
Tensile strength	مقاومة الشد
Blood plasma	بلازما الدم
Syphon	سيفون
Pycnometer	بكنومتر (مقياس الثقل النوعى)
Stoplight	مصباح إشارات المرور
Vacuum chamber	غرفة تفريغ
Stamping machine	مكنة تشغيل بالكبس
Stokes' law	قانون ستوكس

Reynolds number	عدد رينولدر
Sedimentation speed	سرعة الترسيب
Hypodermic needle	إبرة تحت جلدية (للحقن تحت الجلد)

الفصل العاشر

Thermal properties of matter	الخواص الحرارية للمادة
Caloric	كالوريك . السيال الحرارى
Chip	نحاته . شظية
Drill	مثقاب
Thermometer	ترمومتر
Freezing point	نقطة التجمد . درجة التجمد
Boiling point	نقطة الغليان . درجة الغليان
Scale of temperature	مقياس درجات الحرارة
Temperature scale	مقياس درجات الحرارة
Celsius scale	مقياس « سلسيوس »
Centigrade scale	مقياس مئوى لدرجات الحرارة
Fahrenheit scale	مقياس « فهرنهيت »
Kelvin scale	مقياس « كلفن »
Clesius degree	درجة سلسيوس . درجة مئوية
Fahrenheit degree	درجة فهرنهيتية ، درجة فهرنهيت
Kelvin degree	درجة كلفن
Thermistor	ترمستور
Response time	زمن الاستجابة
Electrical resistance	مقاومة كهربائية
Intercept	الجزء المحصور
Absolute temperature	درجة الحرارة المطلقة
Absolute temperature scale	المقياس المطلق لدرجات الحرارة
Liquifaction	إســالة
Mole	جزىء جرامى . جزىء . مول
Avogadro's number	عدد أفوجادرو
Atomic mass	كتلة ذرية
Atomic weight	وزن ذرى
Molecular mass	كتلة جزيئية
Molecular weight	وزن جزيئى
Kilogram-mole (kg mol)	جزىء كيلوجرامى

Gas-law constant	ثابت قانون الغاز
Boltzmann's constant	ثابت بولتزمان
Absolute zero	الصفر المطلق
Superfluidity	فوق السيولة . فرط السيولة
Super conductivity	فوق الموصلية
Triple point	النقطة الثلاثية
Gas thermometer	الترموى الغازى
Pressure guage	مقياس الضغط
Guage pressure	ضغط المقياس
Liter	لتر
Molecular velocity	السرعة الجزيئية
Probability	احتمال
Maxwell's theory	نظرية ماكسويل
Kinetic theory of gases	النظرية الحركية للغازات
Calloidal particles	دقائق غروانية (أو شبه غروية)
Monatomic	أحادى الذرة
Photoelectric effect	التأثير الكهربائى الضوئى
Partial pressure	ضغط جزئى
Dalton's law of partial pressures	قانون دالتون للضغوط الجزئية
Osmotic pressure	الضغط الأوزموزى
Osmometer	أوزمومتر . مقياس الضغط الأوزموزى
Semipermeable memberane	غشاء شبه منفذ
Solute	مذاب
Solvent	مذيب
Solution	محلول
Mixture	مخلوط . خليط
Memberane	غشاء
Albumin	زلال
Dryice	ثلج جاف
Surroundings	محيطات . جو محيط
Thermal equilbrium	توازن حرارى
Nutritionist calorie	سعر الغذوى
Heat capacity	سعة حرارية
Specific heat capacity	السعة الحرارية النوعية
Cooling	تبريد
Phase change	تغير الطور
Crystalline phase	الطور البلورى

Liquid phase	طور السيولة . الطور السائل
Gas phase	طور الغاز
Vapor phase	طور البخار . الطور البخارى
Heat of vaporization	حرارة التبخير
Evaporation	تبخر . بخر
Heat of evaporation	حرارة التبخر
Vaporization	تبخير .
Vapor pressure	ضغط البخار
Torr	تور : وحدة ضغط تعادل ضغط مليمتر واحد من الزئبق
Saturated vapor	بخار مشبع
Heat of fusion	حرارة الانصهار
Fusion	انصهار . صهير
Melting point	نقطة الانصهار
Superheat	احمى . حمص فائق الحرارة
Melting	انصهار . صهر
Crystallinity	درجة التبلور
Calorimetry	قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)
Calorimeter	مسعر : كالوريمتر
Metabolism	أيض
Thermal expansion	تمدد حرارى
Lengthening pipe	ماسورة تطويل
Heating system	نظام تدفئة
Linear thermal expansion coefficient	معامل التمدد الطول الحرارى
Thermal volume expansion coefficient	معامل التمدد الحرارى الحجمى
Gallon	جالون
Transfer of heat	انتقال الحرارة
Conduction	توصيل
Heat conduction	توصيل حرارى
Heat transfer	انتقال الحرارة
Heat transmission	نقل أو ارسال الحرارة
Heat conductivity	الموصلية الحرارية
Molecular collision	تصادم جزيئى
Conductor	موصل
electrical conductor	موصل كهربائى
Heat conductor	موصل حرارى
Valence electron	الكترون التكافؤ
Convection	حمل

Heat convection	حمل حرارى
Register	جهاز تحكم فى دخول الهواء (أو خروجه) مسجل – مكنة تسجيل
Convective current	تيار الحمل
Gulf stream	تيار الخليج
Radiation	اشعاع
Heat radiation	اشعاع حرارى
Ether	أثير
Luminiferous ether	أثير وضاء (ناقل للضوء)
Newton's law of cooling	قانون نيوتن للتبريد
Stefan's law	قانون ستيفان
Black body	جسم أسود
Reflectivity	انعكاسية
Absorber	ماص . ممتص
Radiator	مشع
Humidity	رطوبة
Water content	المحتوى المائى
Supersaturated vapor	بخار فوق مشبع
Dew	ندى
Dew point	نقطة الندى
Weather bureau	مكتب الاحوال الجوية
Meteorologist	ارصادى . خبير ارصاد جوية
Wet-bulb thermometer	الترمومتر ذو البصيلة المخضلة
Dry-bulb	الترمومتر ذو البصيلة الجافة
Specific heat	الحرارة النوعية
Dichloro ethane	ثانى كلوريد الايثان
Water equivalent	المكافىء المائى
Shrink fit	توافق انكماش
Heat-resistant glass	زجاج مقاوم للحرارة
Dehumidifier	مزيل الرطوبة . مجفف الهواء

الفصل الحادى عشر

Diatomic	ثنائى الذرة
Chemical bond	رابطة كيميائية
Internal energy	طاقة داخلية
Heat flow	سريان الحرارة

Total energy	طاقة كلية
Vibrational energy	طاقة اهتزازية
Statistical mechanices	الميكانيكا الاحصائية
Heat energy	طاقة حرارية
Heat gain	كسب حرارى
Heat loss	فقد حرارى
British thermal unit (Btu)	الوحدة الحرارية البريطانية (و .ح .ب)
Caloric	سعر . كالورى .
Quantity of heat	كمية الحرارة
Large caloric	سعر كبير
Kilo calorie	كيلو كالورى .

الفصل الثانى عشر

Sound	صوت
Compressional disturbance	اضطراب تضاغطى
Eardrum	طبلة الأذن
Material vibration	اهتزاز مادى
Transmitting medium	وسط ناقل
Sound box	صندوق مصوت
Firecracker	سهم نارى مفرقع
Sound wave	موجة صوتية
Rarifaction	تخلخل
Diaphragm	غشاء
Loudspeaker	مكبر الصوت
Pressure wave	موجة ضغطية
Wave-front	جبهة الموجة
Speed of sound	سرعة الصوت
sound intensity	شدة الصوت
Loudness	جهارة
Sound intensity scale	مقياس شدة الصوت
Decibel	ديسيبل
Decibel scale	مقياس الديسيبل
Bel	بل

Thermodynamics	الديناميكا الحرارية
Thermodynamic	دينامى حرارى
Gross property	خاصية اجمالية
State variable	متغير الحالة
System	نظام
Entropy	انتروبيا
Macroscopic	ماكروسكوبى
Work content	محتوى الشغل
Heat content	المحتوى الحرارى
Mechanical action	فعل ميكانيكى
Balance-sheet	ميزانية – كشف ميزانية
First law of thermodynamics	القانون الأول للديناميكا الحرارية
Expansion work	شغل التمدد
P-V diagram	رسم بيانى P-V
P-V curve	منحنى P-V
Isothermal	ايسوثرمى . متساوى درجة الحرارة
Isothermal process	عملية ايسوثرمية
Isothermal change	تغير ايسوثرمى
Isothermal compression	انضغاط ثابت درجة الحرارة (ايسوثرمى)
Heat reservoir	خزان حرارى . مستودع حرارى
Reversible	انعكاسى
Reversible process	عملية انعكاسية
Adiabatic	ادياباتى
Adiabatic compression	انضغاط أدياباتى
Adiabatic process	عملية أدياباتية
Adiabatic change	تغير أدياباتى
Adiabatic work	شغل أدياباتى
Diesel engine	محرك ديزل
Throttling process	عملية تخفيف الضغط بالخنق
Cycle	دورة
Thermodynamic cycle	دروة دينامو حرارية
Cyclic process	عملية دورية
Process	عملية
Efficiency	كفاية – كفاءة
Refrigerator	مبرد

Work output	خرج الشغل
Energy input	دخل الطاقة
Otto cycle	دورة أوتو
Engine efficiency	كفاءة المحرك (أو الآلة)
Internal combustion	احتراق داخلى
Internal combustion engine	محرك احتراق داخلى
Exhaust	عادم . تصريف
Exhaust energy	طاقة العادم
Steam engine	محرك بخارى
Steam turbine	تربين بخارى
Gasoline engine	محرك جازلينى (نيزمين)
Diesel engine	محرك ديزل
Highest possible efficiency	أعلى كفاءة ممكنة
Carnot cycle	دورة كارنو
Carnot engine	محرك كارنو
Maximum efficiency	الكفاءة القصوى
Steam boiler	غلاية البخار
Ambient temperature	درجة الحرارة المحيطة
Heat pump	مضخة حرارية – مكنة تبريد
Refrigeration	تبريد
Refrigeration system	جهاز تبريد
Compressor	ضاغط
Coil	مجموعة أنابيب متصلة
Throttling valve	صمام خانق
Cooling compartment	صندوق التبريد
Air-conditioning unit	وحدة تبريد الهواء
Running time	زمن الدوران (أو التشغيل)
Refrigeration unit	وحدة تبريد
Ton of refrigeration	طن تبريد
Second law of thermodynamics	القانون الثانى للديناميكا الحرارية
Event	حدث
Spontaneous event	حدث تلقائى
Odds	ارجحية – خلاف
Order	نظام
Disorder	فوضى (خلل النظام)
Combination	توافقية
Percentage deviation	الانحراف المئوى

Thermal motion	حركة حرارية
Entropy change	تغير الانتروبيا
Isolated system	نظام معزول
Radiant energy	طاقة أشعاعية (أو مشعة)
Raddle wheel	عجلة تغديف
Heat of combustion	حرارة الاحتراق
Nuclear power plant	وحدة نووية لتوليد القدرة

الفصل الثالث عشر

Wave motion	حركة موجية
Vibrating system	نظام يهتز
Restoring force	قوة الاستعادة
Amplitude of vibration	سعة الاهتزاز
Period	الزمن الدورى
Period of vibration	زمن الاهتزاز
Frequency of vibration	تردد الاهتزاز
Hertz (Hz)	هرتز
Pendulum	بندول
Oscillation	ذبذبة
Vibration	اهتزاز
Cycle per second (cps)	دورة فى الثانية
Simple harmonic motion	الحركة التوافقية البسيطة
Spring constant	ثابت الزنبرك
Reference circle	دائرة الاسناد
Sinusolidal vibration	اهتزاز جيبى
Sinusoidal curve	منحنى جيبى
Sinusoidal motion	حركة جيبية
Simple pendulum	زمن الخطران (أو الارتجاح)
Bob	ثقل البندول
Forced vibration	اهتزاز قسرى
Damped	متضائل
Damping	مضاءلة
Damped system	نظام متضائل
Overdamped	زائد المضاءلة
Underdamped	ناقص المضاءلة
Critical damping	مضاءلة حرجة
Critically damped system	نظام حرج المضاءلة

Free vibration	اهتزاز طليق (أو حر)
Driven system	نظام مقود
Natural frequency	التردد الطبيعى
Resonance	رنين
Resonance frequency	تردد الرنين
Resonance vibration	اهتزاز الرنين
Driven vibration	اهتزاز مقود
Ball bearing	محمل كريات
Natural period	الزمن الدورى الطبيعى
Suspension system	نظام تعليق
Connecting rod	ذراع توصيل

الفصل الرابع عشر

antenna	هوائى
Transverse wave	موجة مستعرضة
Spring steel	صلب الزنبركات
Propagation	انتشار
Crest	قمة
Trough	قرار
Overlap	تراكب
Principle of superposition	مبدأ التراكب
Superposition principle	مبدأ التراكب
Incident wave	موجة ساقطة
Reflected wave	موجة منعكسة
Standing wave	موجة مستقرة (أو واقفة)
In-phase	متفق الطور .
Out of phase	متفاوت الطور .
Resonance motion	حركة رنينية
Tuning fork	شوكة رنانة
Quantized	مكماة (موجودة بشكل مضاعفات لكم ثابت)
Resonant wave-length	الطول الموجى الرنينى
Mode	نمط
Resonant mode	نمط رنينى
Mode of vibration	نمط الاهتزاز
Nodal line	خط عقدي

Nodal point	نقطة عقدية
Node	عقدة
Antinode	بطن (الموجة)

الفصل الخامس عشر

Longudinal wave	موجة طولية
Compressional wave	موجة تضاغطية
Loop	حلقة
Fundamental frequency	التردد الاساسى
Coil spring	زنبرك ملتف
Sound level	مستوى (شدة) الصوت
Intensity level	مستوى شدة الصوت
Jackhammer	ثقابة الصخور
Riveter	مكنة برشمة
Loudness level	مستوى الجهارة
Frequency response	الاستجابة الترددية
Ultrasonic waves	امواج فوق سمعية
Audible sound	صوت مسموع
Quality of sound	نوع الصوت
Pitch of sound	درجة الصوت
Tone	نغمة
Tone-deaf	اضم للطبقات الصوتية
Sine-wave voltage	فلطية جيبية
Threshold of hearing	عتبة السمع
Threshold of pain	عتبة الالم
Harmonic	توافقية
Fundamental harmonic	توافقية أساسية
Overtone	نغمة توافقية
Interference	تداخل
Receiver	مستقبل
Path length	طول المسار
Phase	طور
Constructive interference	تداخل بناء
Destructive interference	تداخل اتلافى (هدام)
Phase difference	فرق الطور

Beats	الضربات
Organ pipe	أنبوبة الأرغن
Kundt's tube	أنبوبة كونت
Air column	عمود هوائى
Musical scale	سلم موسيقى
Major musical scale	السلم الموسيقى الكبير
Harmonic combination	تركيبة توافقية (أوهارمونية)
Musical interval	مسافة موسيقية
Octave	جواب (النغمة)
Doppler effect	ظاهرة دوبلر
Doppler shift	زحزحة دوبلر
Frequency shift	زحزحة التردد
Shock wave	موجة صدمية
Sonic boom	دوى اختراق جدار الصوت
Mach	ماخ
Mach number	العدد الماخى
Reverbration time	زمن الترداد
Sonar	سونار
Radar	رادار

الفصل السادس عشر

Electron	الكترون
Volence electron	الكترون تكافؤ
Charging by conduction	الشحن بالتوصيل
Charging by induction	الشحن بالحث
Grounded	مؤرض (متصل بالأرض)
Coulomb's law	قانون كولوم
Electric field	مجال كهربائى
Positive test charge	شحنة اختبار موجبة
Electric lines of force	خطوط القوة الكهربائية
Electrostatic	الالكتروستاتى
Electric field	شدة المجال الكهربائى
Capacitor condenser	مكثف
Equipotential line	خط متساوى الجهد
Equipotential plane	مستوى متساوى الجهد
Absolute potential	الجهد المطلق .

الفصل السابع عشر

القوة الدافعة الكهربائية (ق . د . ك)	Electromotive forece (emf)
مدفع الكترونى	Electron gun
الالكترون – فولت	Electron-volt
التيار	Current
امبير	Ampere
مقاوم	Resistor
مقاومة	Resistance
قانون أوم	Ohm's law
على التوالى	In series
هبوط الجهد	Potential drop
المقاومية	Resistivity
الموصلية	Conductivity
مفرط الموصلية	Supperconductor
السعة	Capacitance
المجاوزية	Permitivity
عزل	Dielectric
ثابت العزل	Dielectric constant
المجاوزية النسبية	Relative permittivity
جزيئات ثنائية الاستقطاب	Dipolar molecules
عزم ثنائى الاستقطاب	Dipole moment

الفصل الثامن عشر

قاعدة النقطة لكيرتشوف	Kirchoff's point rule
قاعدة العروة لكيرتشوف	Kirchoff's loop rule
مجزىء الجهد	Potential divider
جهاز رسم المخ	Electroencephalograph
بطارية قياسية	Standard battery
جهد طرفى	Terminal potential

الفصل التاسع عشر

قطب شمالى	North pole
قاعدة اليد اليمنى	Right-hand rule
شـــدة	Intensity

Flux density	كثافة التدفق
Magnetic induction	الحث المغناطيسى
Magnetic field strength	شدة المجال المغناطيسى
Flux	التدفق
Permeability	الانفاذية
Ampére circuital law	قانون أمبير للدوائر
Sobenoid	ملف لولبى
Toroid	ملف حلقى
Pole fiction	خرافة القطب
Ferromagnetic atoms	ذرات ذات مغناطيسية حديدية
Spin	تدويم
Curie temperature	درجة حرارة كورى
Domain	منطقة (مغناطيسية)
Electromagnet	مغناطيس كهربى
Magnetic permeability	الانفاذية المغناطيسية
Saturated	مشبع
Hysteresis loop	انشوطة التخلفية
Retentivity	محتفظية
Coercive force	قوة مغناطيسية قهرية

الفصل العشرون

Inductance	محاثة
Induced current	التيار المستحث
Shunt	مقاومة مجزىء التيار
Magnetic moment	العزم المغناطيسى
Primary coil	الملف الابتدائى
Secondary coil	الملف الثانوى
Induced e.m.f.	ق .د .ك المنتجة بالحث
Lenz's law	قانون « لنز »
Faraday's law	قانون « فارادای »
Mutual inductance	محاثة متبادلة
Inductor	ملف محاثة
Contact	ملامسى
a.c. Generator	مولد التيار المتردد
Slip ring	حلقة انزلاق
Brush contact	تلامس فرجونى
Armature	عضو الانتاج

Counter e.m.f.	ق .د .ك المضادة
Overloaded	حمل فوق طاقته
Knife switch	مفتاح سكينى
Eddy current	تيار دوامى
Magnetic damping	مضاءلة مغناطيسية

الفصل الواحد والعشرون

Reactive circuit	دائرة مفاعلة
Exponential decay	اضمحلال أسّى
Time constant	الثابت الزمنى
Bleeder resistance	مقاومة تجزئية
Electroplating	الطلاء بالكهرباء
Root mean squar (rms) cu	جذر متوسط مربع التيار
Peak current	قيمة الذورة للتيار
Capacitive	سعوى
Reactance	مفاعلة
Out of phase	متفاوت الطور
Inductive reactance	المفاعلة الحثية
Impedance	المعاوقة
Power factor	عامل القدرة
resonance frequency	تردد الرنين
Oscillator	مذبذب
resonant circuit	دائرة رنانة
Yoke	مقرن
Driving voltage	الجهد الحافز
Step up transformer	محول رفع
Step down transfermer	محول خفض
Filter	مرشح
Output voltage	جهد الخرج
Input	دخل
Wave form	الشكل الموجى
Effective value	القيمة الفعالة
Average value	القيمة المتوسطة
In-phase	متطاور
Leading current	تيار متقدم

الفصل الثانى والعشرون

Thermionic emission	الابتعاث الثرميونى
Solid state devices	نبيطات الحالة الصلبة
Electron gas	غاز الكترونى
Work-function	دالة الشغل
Diode	صمام ثنائى
Cathode	مهبط
Filament	فتيلة
Covalent bond	ترابط اسهامى
Lattice	شبيكة
n-type semi-conductor	شبه موصل سالب النوع
Vacancy	ثغرة
Hole	فجوة
P-type semi-conductor	شبه موصل موجب النوع
Steady current	تيار مطرد
Drain	نزح
Amplifier	مضخم
Half wave rectifier	مقوم نصف موجى
Ripple	تموج
Transmitting antenna	هوائى الإرسال
Carrier frequency	تردد الموجة الحاملة
Loop antenna	هوائى اطارى
Tuning	موالفة
Modulated	مضمنة
Microphone	ميكروفون
Frame of reference	مناط إسناد
Diathermy	العلاج بالإنفاذ الحرارى

الفصل الثالث والعشرون

Corpuscle	جسيم
Emission	طيف الابتعاث
Spectroscopy	علم الطيف
Refractive index	معامل الانكسار
Crown glass	زجاج تاجى
Flint glass	زجاج ظرانى أو صوانى

Wave-front	صدر الموجة
Absolute index of refraction	معامل الانكسار المطلق
Relative index of refraction	معامل الانكسار النسبى
Snell's law	قانون « سنل »
Interface	سطح بينى
Light pipe	أنبوبة ضوئية
Focal length	البعد البؤرى
Virtual (or imaginary) image	صورة تقديرية
Concave shpherical mirror	مرآة كروية مقعرة
Convex shpherical mirror	مرآة كروية محدبة
Principal axis	المحور الرئيسى
Focus	بـؤرة
Focal point	النقطة البؤرية
Parabolic mirror	مرآة مكافئية المقطع
Real image	صورة حقيقيه
Specular reflection	انعكاس مرآوى
Diffuse reflection	انعكاس انتشارى

الفصل الرابع والعشرون

Retina	الشبكية
Cornea	القرنية
Iris diaphragm	حاجب الحدقة القزحية
Pupil	إنسان العين
Nearsighted or myopic	حسير أو قصير النظر
Far point	النقطة البعيدة
Near point	النقطة القريبة
Farsighted or hyperopic	طويل النظر
Accomodation	التكيف
Bifocal	ثنائى البؤرة
Astigmatism	لا استجمى
Blur	تشويش
Spherical aberration	الزيغ الكروى
Chromatic aberration	الزيغ اللونى
Achromatic lens	عدسة لالونية
Angle subtended	الزاوية المقابلة
Magnifying power	قوة التكبير
Objective lens	العدسة الشيئية

Barrel (microscope)	قصبة
Eyepiece lens	العدسة العينية
Telescope	تلسكوب (مقراب)
Microoscope	ميكروسكوب (مجهر)
Field lens	عدسة المجال
Spy glass	نظارة مقربة
Prism binocular	منظار ثنائى العينية منشورى
Spectroscope	سبكتروسكوب (مطياف)
angle of deviation	زاوية الانحراف
radioastronomy	علم الفلك الاشعاعى
Wire mesh	شبيكية السلك
Collimating lens	عدسة التسديد
Monochromatic	احادى اللون
Polarized light	ضوء مستقطب

الفصل الخامس والعشرون

Diffuse fringe	هدبة منتشرة
Diffraction grating	محزوز الحيود
Interfermeter	مقياس التداخل
Michelson's interferometer	مقياس التداخل لمايكلسون
Semitransparent mirror	مرآة شبه شفافة
Refractive index	معامل الانكسار
Index of refraction	معامل الانكسار
Film	غشاء
Optical path length	طول المسار الضوئى
Equivalent optical path length	طول المسار الضوئى المكافىء
Newton's rings	حلقات نيوتن
Grating spectrometer	مطياف ذو محزوز حيود
Collimator	الميزاء
Cross hairs	شعيرات متعامدة أو متصالبة
High-order maximum	النهاية العظمى ذات الرتب العليا
Grating equation	معادلة المحزوز
Grating spacing	تباعد المحزوز
Bright-line spectrum	الطيف الخطى الساطع
Incandescent bulb	مصباح متوهج

Continuous spectrum	طيف مستمر
Single slit	شق احادى
Exposure time	زمن التعريض
Limit	حد
Resolving power	قدرة التحليل
Resolution	تحليل
Optical device	وسيلة أو جهاز بصرى
Physical optics	بصريات فيزيائية
Washer	فلكة (وردة)
Bragg equation	معادلة براج
Interference	تداخل
Diffraction	حيود
Coherence (Coherency)	تماسك (ترابط)
Coherent	متماسك (مترابط)
Constructive interference	تداخل بناء
Destructive interference	تداخل اتلافى
In phase	متفق الطور
Out of pahse	متفاوت الطور
Crest	قمة
Trough	قرار
Wave length	الطول الموجى
Phase difference	فرق الطور
Path difference	فرق المسار
Plane wave	موجة مستوية
Slit	شق - جذة
Phase	طور
Path	مسار
Amplitude	سعة (اتساع)
Antinode	بطن الموجة
Node	عقدة
Young's double slit-experiment	تجربة الشق المزدوج ليونج
Interference of light	تداخل ضوئى
Bright	ساطع
Brightness	سطوع
Fringe	هدبة
Sodium arc	قوس صوديومى
Interference pattern	نمط التداخل

Interference band	شريط التداخل
Photographic plate	لوح فوتوغرافى
Order	رتبة
Fringe spacing	تباعد الهداب
Bragg reflection	انعكاس براج
Rock salt	الملح الصخرى
Polycrystalline	متعدد البلورات
Laue diffraction	تداخل لاو
Debye-scherrer diffraction	تداخل ديباى – شيرر
Loudspeaker	مجهار (مكبر الصوت)
Oscillator	مذبذب
Coated lens	عدسة مغلفة
Prism	منشور
Hue	النَّقْبة
Magenta	ماجنتا (لون أحمر مزرق)
Screw	لولب . قلاووظ
Screw pitch	خطوة اللولب
Lucite	لوسيت
Angular separation	انفصال زاوى
Reflection grating	محزوز عاكس
Transmission grating	محزوز منفذ

الفصل السادس والعشرون

Black body	جسم أسود
Planck's constant	ثابت بلانك
Photoelectric effect	التأثير الكهرضوئى
Photocell	خلية كهرضوئية
Photoelectric threshold wave length	الطول الموجى الكهرضوئى المشرف
Stopping potential	جهد إيقاف
Quantized energy	طاقة مكماة
Quantum	كم
Photon	فوتون
Photoelectric equation	المعادلة الكهرضوئية
Scattering	استطارة
Scattered light	ضوء مستطير

Milky way	التبانة
reference frame	إسناد
Inertial reference frame	إسناد قصورى
Reductio ad absurdum	الخطأ
Time dilation	لزمن
Twin paradox	ى الظاهرى للتوائم
Rest mass	لسكون
Pair production	وجى
De broglie wavelength	ى برولى الموجى
Heeisenberg uncertainty principle	عدم التيقن لها ينزنبرج
Probe particle	المجس
Quantum mechanics	كا الكم
Wave mechanics	كا الموجية
Pattern	
Schrodinger equation	شرودنجر
Quantized	

الفصل السابع والعشرون

Thompson model	طومسون
Nuclear atom	النووية
Nucleus	
Series limit	لتسلسلة
Balmer series	سلة بالمر
Rydberg constant	رايدرج
Lyman series	سلة ليمان
Paschen series	سلة باشن
Stable orbit	مستقر
Electron transition	الكترونى
Unexcited	مستثار
Energy level diagram	يانى لمستويات الطاقة
Ground state	الأرضية
Singly ionized	التأين
Ionization energy	التأين
Wave equation	ة الموجية
Wave function	الموجية

Quantum numbers	الأعداد الكمية
Shell	قشرة
Orbital quantum number	العدد الكمى المدارى
Spin quantum number	العدد الكمى للتدويم
State	حالة
Pauli exclusion principle	مبدأ باولى للاستبعاد
Characteristic X-rays	أشعة X المميزة
Bremsstrahlung	أشعة الفرملة
Line spectrum	طيف خطى
Continuous spectrum	طيف مستمر
Band spectrum	طيف شريطى
Infrared spectroscopy	دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء
Incoherent beam	شعاع غير متماسك
Coherent beams	الأشعة المتماسكة
Laser	الليزر
Metastable state	حالة مؤقتة الاستقرار
Subshell	قشرة فرعية
Bombardment	قذف

الفصل الثامن والعشرون

Atomic mass unit	وحدة الكتلة الذرية
Nucleous	نويات
Atomic mass number	عدد الكتلة الذرية
Mass number	عدد الكتلة
Unified system	النظام الموحد
Mass spectrograph	مطياف الكتلة
Ion source	مصدر أيونى
Relative abundance	الكثرة النسبية
Isotopes	نظير
Mass deficit	الفقد الكتلى
Binding energy	طاقة الترابط
Radioactivity	النشاط الاشعاعى
Radioactive	مشع
Decay constant	ثابت الانحلال
Disintegration	تفتت
Curie	كورى
Parent nucleus	نواة نتوج

Background radiation	الخلفية الاشعاعية
Baryon	باريون
Nuclear reaction	تفاعل نووى
Transmute	يتحول
Chain reaction	تفاعل متسلسل
Fission	انشطار
Self-sustained	ذاتى المداومة
Critical mass	الكتلة الحرجة
Moderator	مهدىء (النيوترونات)
Photographic emulsion	مستحلب فوتوغرافى
Cloud chamber	الغرفة السحابية
Bubble chamber	غرفة الفقاعات
Geiger counter	عداد جيجر
Santillation counter	عداد الوميض
Photomultiplier	مضاعف ضوئى
Rem	المكافىء البشرى للراد rad (رم)
Quality factor	معامل الجودة
Radiation damage	اتلاف اشعاعى
Antiparticle	جسيم مضاد

الفصل التاسع والعشرون

Premordial fireball	الشهاب الأولى المتوهج
Big-bang theory	نظرية الانفجار العظيم
Galaxy	مجرة
Red giant	العملاق الأحمر
Triple alpha reaction	تفاعل ألفا الثلاثية
Wite dwarf	القزم الأبيض
Nova	نجم مستعر
Supernova	نجم متفجر فائق التوهج
Red shift	الزحزحة الحمراء
Radioactive dating	التأريخ الاشعاعى
Radiocarbon dating	تأريخ بالكربون المشع
Mantle	طبقة مغلقة

الفهـــرس

« ب »

« ت »

« غ »

« ف »

« ق »

« ك »

« ل »

« م »

رقم الإيداع ٨٩/٧٢٦٦

مطابع المكتب المصرى الحديث
MODERN EGYPTIAN PRESS

PRI CIPLES O PHYSICS
Bueche

صدر ايضا للناشر فى
الفيزياء

- فيزياء السنة الأولى الجامعية (شوم)
- ... فى الفيزياء (المجلد الاول ...)
- مقرر ... فى الفيزياء (المجلد ... الكهربية والمغناطيسية)
- مقرر ... فى الفيزياء (المجلد الرابع ... الفيزياء ...)
- ... زيا ...
- اساسيات البصريات
- العلوم الفيزيائية ...
- الفيزياء - اسئلة ومسائل محلولة لطلبة الثانوية العامة (تحت الطبع)

تطلب من :

الدار الدولية ... التوزيع

... روكسى - مصر الجديدة

ص.ب ٥٥٩٩ هليوبوليس ... القاهرة

تليفون : ٢٥٨٢٨٨٧

تلكس : PHCRB UN ٢٠٠٧١/٢٠٠٧٠

فاكس : ٠٠٢٠٢/٢٩١٨٠٥٩

INTERNATIONAL PUB. & DIST. HOUSE

CAIRO — KUWAIT — LONDON

ISBN: 977-5107-01-6